

**Untersuchung von Materialien zur Abdichtung des Kontaktbereichs  
zwischen Streckenverschlussbauwerken aus hydraulisch  
abbindenden Baustoffen und dem Salzgebirge**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades  
der Ingenieurwissenschaften

Vorgelegt von:  
M.Sc. Jonas Leonard Weber  
aus Mainz

genehmigt von der  
Fakultät für Energie- und  
Wirtschaftswissenschaften der Technischen  
Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung

25.06.2018

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.dnb.de>.

Vorsitzender der Promotionskommission: Prof. Dr.-Ing. Norbert Meyer

Hauptberichterstatte: Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld

Mitberichterstatte: Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Düsterloh

Dissertation Clausthal 2018

### **D 104**

© **PAPIERFLIEGER VERLAG** GmbH, Clausthal-Zellerfeld, 2018  
Telemannstraße 1 · 38678 Clausthal-Zellerfeld  
[www.papierflieger.eu](http://www.papierflieger.eu)

Urheberrechtlich geschützt, alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Wege (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2018

**ISBN 978-3-86948-654-3**

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing Oliver Langenfeld sowie Herrn Professor Uwe Düsterloh, für die persönliche Betreuung sowie zahlreiche Diskussionsrunden.

Danken möchte ich auch den Kollegen am Institut für Bergbau, für die Unterstützung während der Erstellung der Arbeit, sowie allen Probelesern.



# Inhaltsverzeichnis

1 Einführung in den deutschen Endlagerbergbau .....	7
1.1 Problemstellung der Arbeit .....	8
2. Aufbau eines Endlagers .....	12
2.1 Mögliche Wirtsgesteine .....	12
2.2 Grubengebäude .....	14
2.3 Mehrbarriersystem – Barrieren eines Endlagers .....	15
3. Geotechnische Barrieren - Streckenverschlussbauwerke .....	17
3.1 Anforderungen an Streckenverschlussbauwerke .....	17
3.2 Aufbau eines Streckenverschlussbauwerks .....	19
3.3 Integrale Permeabilität/ Strömungsräume .....	20
3.3.1 Salzgebirge .....	21
3.3.2 Baustoff des Streckenverschlussbauwerks .....	24
3.3.3 Kontaktbereich Baustoff/Gebirge .....	28
3.4 Bildung Kontaktfuge / Schädigung des Kontaktbereichs .....	29
4. Injektionen .....	32
4.1 Injektionen im Salz .....	33
4.2 Anforderungen an Injektionsmaterialien im Salz .....	38
4.3 Verfügbare Injektionsmaterialien für den Einsatz im Salz .....	43
4.3.1 Partikelgestützte Injektionsmaterialien .....	46
4.3.2. Partikelfreie Injektionsmaterialien .....	48
4.4 Beständigkeit von Injektionsmaterialien unter salinaren Bedingungen .....	53
5 Laborative Charakterisierung der rheologischen Eigenschaften ausgewählter Injektionsmaterialien .....	57
5.1 Aufbau der Messungen .....	57
5.1.1 Viskositätsmessungen .....	57
5.1.2 Rheologie – Marshtrichter .....	59
5.1.3 Dichtemessungen .....	60
5.1.4 Grenzflächenspannung .....	60
5.1.5 Kontaktwinkel .....	62
5.2 Durchführung von Messungen zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften ausgewählter Injektionsmaterialien .....	62
5.2.1 Viskositätsbestimmung .....	63
5.2.2 Rheologie – Marshtrichter .....	63

5.2.3 Dichtemessung .....	64
5.2.4 Grenzflächenspannung.....	64
5.2.5 Kontaktwinkel.....	64
5.3 Rheologische Eigenschaften ausgewählter Injektionsmaterialien – Messergebnisse und Interpretation.....	66
5.3.1 Viskositätsbestimmung .....	66
5.3.2 Rheologie – Marshtrichter.....	74
5.3.3 Dichtemessung .....	75
5.3.4 Grenzflächenspannung.....	75
5.3.5 Kontaktwinkel.....	76
5.4 Theoretische Betrachtungen zum Eindringverhalten der Injektionsmaterialien.....	79
6 Modellversuche zur Erzeugung und Injektion einer Kontaktfuge im Labor.....	84
6.1 Gewinnung und Herstellung der Probenkörper .....	85
6.2 Laboratives verfahren zur Erzeugung einer Kontaktfuge.....	86
6.3 Injektion der Kontaktfuge.....	92
6.4 Analyse des Injektionserfolgs .....	94
6.4.1 Verfahren zur Bewertung des Injektionserfolgs.....	94
6.4.2 Optische und messtechnische Analyse des Injektionsergebnisses .....	100
7 Interpretation der Ergebnisse .....	106
8 Zusammenfassung und Ausblick .....	109
Literatur.....	113
Anhangsverzeichnis:.....	119

## Abbildungsverzeichnis:

Abb. 1: Links: Lage von Deckgebirge, Wirtsgestein, einschlusswirksamen Gebirgsbereich und Endlagerbergwerk zueinander. Rechts: Schematische Übersicht der einzelnen Barrieren eines Endlagers[5].	12
Abb. 2: Aufbau eines Endlagerbergwerks[13].	14
Abb. 3: Vereinfachtes Prinzip eines Streckenverschlussbauwerks mit den einzelnen Funktionselementen[24].	19
Abb. 4: Permeabilitätsmessungen eines Streckenverschlussbauwerks. Die Permeabilitätsmesswerte im rechten Bereich der Abbildung wurden im Steinsalz, dem Kontaktbereich Bauwerk/Gebirge sowie im Baustoff ermittelt und zeigen dass die Kontaktfuge den Bereich mit der höchsten Permeabilität aufweist [101].	29
Abb. 5: Schwindmaße des Salzbetons M2 in Abhängigkeit der Abbindezeit der Prüfkörper. Die Proben Klima 20/40 wurden bei 20°C und 40 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert und die Proben Klima 20/65 bei 20° C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit[28].	30
Abb. 6: Siebdurchgangslinie des Hartbitumens	48
Abb. 7: Modellhafte Darstellung des Ablaufes einer Wasserglasinjektion in eine Wegsamkeit im Steinsalz. Die fortschreitende Injektion dringt immer weiter ein, bis die komplette Wegsamkeit gefüllt ist. Im Kontakt mit dem Steinsalz setzt eine Gelierung des Wasserglases ein, die im Modell durch die unterschiedlich großen Kugeln dargestellt ist [53].	50
Abb. 8: In Halit fixierte Lösung, die vom Erhärtungsprozess des Silicatgels herrührt. Mit Uranin getracertes Natron-Wasserglas wurde in Steinsalz injiziert, daher die grüne Färbung der Lösungen. Links: parallele Polarisatoren. Rechts: gekreuzte Polarisatoren und Aufnahme unter UV-Licht[89].	51
Abb. 9: Oben links: Probenkörper aus Natronwasserglas und NaCl-Lösung (Verhältnis 1:1) 9 Sekunden nach dem Vermischen. Oben rechts: Schneiden des Probenkörpers ein bis zwei Minuten nach dem Vermischen. Mitte links: Probenkörper ca. 1,5 h nach dem Vermischen. Mitte Rechts: Probenkörper nach 3 Stunden. Unten: Probenkörper 19,5 h nach dem Vermischen mit deutlich sichtbarer Synäreselösung.	52
Abb. 10: Fließschema zur Auswahl des geeigneten Injektionsmaterials in Abhängigkeit von der mineralogischen Zusammensetzung des Gebirges am Barrierenstandort sowie dem Baustoff des Streckenverschlussbauwerks.	56
Abb. 11: Platte-Platte Rheometer[73; 74].	58
Abb. 12: Links: Rheometer Haake Mars III der Firma Thermo Scientific. Rechts: Detailaufnahme der Temperier-Einheit sowie des Probenbechers und des Titandrehkörpers.	59
Abb. 13: Dichtebestimmungsset YDK 01 der Firma Sartorius[78].	60
Abb. 14: Aufbau einer Wilhelmy-Waage.	61
Abb. 15: Links: Benetzte Wilhelmy-Platte. Rechts: Wilhelmy-Platte der Länge b und Breite a die mit der Kraft P in der ursprünglichen Lage gehalten wird.	61
Abb. 16: Kontaktwinkelmessgerät des Typs OCA 15.	62
Abb. 17: Mittelwerte der Viskositätsmessungen mit IM 4+ bei 30 und 40° C.	66
Abb. 18: Definition von Ansteifen, Erstarren und Erhärten von Zement und Beton[79].	67

Abb. 19: Mittelwerte der Viskositätsmessungen mit Ultrafin 12 bei 30 und 40° C. Die grüne als auch die violette Kurve dokumentieren die Mittelwerte der Messungen der mit NaCl-haltiger Lösung angemischten Suspension dar. ....	67
Abb. 20: Mittelwerte der Viskositätsmessungen mit dem 2K-Bitumen bei 30 und 40° C. ....	68
Abb. 21: Mittelwerte der Viskositätsmessungen mit Wasserglas der Grädigkeit 37/40 bei 30 und 40° C. ....	69
Abb. 22: Anhaftungen von vergelten Wasserglas am Drehkörper des Rheometers ....	70
Abb. 23: Mittelwerte der Viskositätsmessungen mit Denepox 40 bei 30 und 40° C. ....	71
Abb. 24: Zusammenstellung der Mittelwerte der Viskositätsmessungen der partikelgestützten Injektionsmittel.....	72
Abb. 25: Zusammenstellung der Mittelwerte der Viskositätsmessungen der partikelfreien Injektionsmittel. ....	73
Abb. 26: Unterschiede in der Viskosität von Wassergläsern in Abhängigkeit von der Temperatur sowie ihrem Wasseranteil ( $W_{WG}$ ). Untenstehend ist die Dichteänderung von Wassergläsern mit unterschiedlichen Wasseranteilen dargestellt[52]. ....	74
Abb. 27: Zusammenfassung der Oberflächenspannung der untersuchten Injektionsmittel bei 30 und 40° C. ....	76
Abb. 28: Häufigkeit der gemessenen Kontaktwinkel von Wasserglas bei 30 und 40° C. ....	77
Abb. 29: Häufigkeit der gemessenen Kontaktwinkel von Ultrafin 12 bei 30 und 40° C. ....	77
Abb. 30: Darstellung der Eindringtiefe der unterschiedlichen Injektionsmittel in den zwei verschiedenen Zeiträumen in eine horizontale Kapillare mit einem Durchmesser von 100 $\mu m$ . ....	82
Abb. 31: Links: Halbierter Salzkern mit der Kerbe für die Injektionsleitung. Mitte: In der Verschalung fixierte Injektionsleitung. Rechts: Halbierter Salzkern mit der in der Kerbe verlegten Injektionsleitung während des Gießens des Betons. ....	85
Abb. 32: Anbindung der Injektionsleitung an den Kontaktbereich zwischen Beton und Salzkern.....	86
Abb. 33: Schematische Darstellung des Spaltzugversuchs nach DIN EN 12390-6 [95] .....	87
Abb. 34: Rissentwicklung im Spaltzugversuch nach Castro-Montero[96] .....	87
Abb. 35: Entwicklung der Haftzugfestigkeit zwischen dem Salzbeton M2 und Steinsalz und dem Schwindmaß des Salzbetons M2 in Abhängigkeit von der Abbindezeit. Die Daten die der Abbildung zugrunde liegen wurden den Planungsunterlagen zur Stilllegung des Endlagers Morsleben entnommen[26; 28].....	88
Abb. 36: Auflichtmikroskopie des im Spaltzugversuch geschädigten Kontaktbereichs zwischen Salzbeton M2 und Steinsalz. Beide Aufnahmen zeigen den gleichen Schliff in unterschiedlicher Vergrößerung. Links Oben ist der Salzbeton und rechts unten das Steinsalz. Die diagonal durch das Bild verlaufende Zone dazwischen ist die hergestellte Kontaktfuge.....	89
Abb. 37: Axialdruck gegen Verformung für den bGZ-Salzbeton. ....	89
Abb. 38: Axialdruck gegen Verformung für den Magnesiabinder MB10. ....	90
Abb. 39: Axialdruck gegen Verformung für alle durchgeführten Spaltzugversuche (grün bGZ-Salzbeton und rot Magnesiabinder MB10).....	91
Abb. 40: Zusammenstellung der injizierten Mengen an Ultrafin 12 (UF) und Wasserglas (WG) in Abhängigkeit von der Länge der Injektionsleitung. Die unterschiedlichen Kombinationen aus dem Beton des Probenkörpers sowie den eingesetzten Injektionsmitteln sind unterschiedlich gekennzeichnet. ....	93



Abb. 41: Links: Übersichtsdarstellung eines Probenkörpers mit den beiden stirnseitig befestigten Schraubpackern und den 3 parallel zur Stirnseite angeordneten Schnitten. Rechts: Beispielhafte Darstellung der vier Abschnitte eines Schnittes die zur Auswertung herangezogen werden. ....	95
Abb. 42: Unterschiedliche Schädigungen des Kontaktbereichs. Oben Links: Schädigung in Form eines Risses entlang des Kontaktbereiches. Oben Rechts Riss im Salz von der Injektionsleitung nach außen auf den Kontaktbereich zulaufend. Unten Links: Rissnetzwerk parallel zum Kontaktbereich im Steinsalz mit bis zu 2 cm Entfernung zum Kontaktbereich. Unten Rechts: Schädigung des Probenkörpers beim Spaltzugversuch in Form eines Risses im Salz parallel zum Kontaktbereich. ....	98
Abb. 43: Vier Kategorien zur Auswertung des im Kontaktbereich vorhandenen Injektionsmittels. Oben Links: Kategorie 1. Oben Rechts: Kategorie 2. Unten Links: Kategorie 3. Unten Rechts: Kategorie 4. ....	99
Abb. 44: 1: Schnitt durch einen Probenkörper bei dem das Steinsalz großflächig mit Ultrafin 12 injiziert wurde. 2: Ultrafin 12 entlang von Korngrenzen zwischen einzelnen Steinsalzkristallen. 3 und 4: Flächig, rissartige mit Ultrafin 12 injizierte Strukturen im Steinsalz. 5 und 6: Flächige, rissartige mit Wasserglas 37/40 injizierte Struktur im Steinsalz. ....	100
Abb. 45: Lage des durch den Spaltzugversuch geschädigten Bereichs in den Probenkörpern für die 4 Materialkombinationen. Diagramm 1: bGZ-Salzbeton und Wasserglas. Diagramm 2: bGZ-Salzbeton und Ultrafin 12. Diagramm 3: Magnesiabinder MB10 und Wasserglas Diagramm 4: Magnesiabinder MB10 und Ultrafin 12. ....	101
Abb. 46: Übersicht über die Menge des in den geschädigten Bereich injizierten Injektionsmittels für die 4 Materialkombinationen. Diagramm 1: bGZ-Salzbeton und Wasserglas. Diagramm 2: bGZ-Salzbeton und Ultrafin 12. Diagramm 3: Magnesiabinder MB10 und Wasserglas Diagramm 4: Magnesiabinder MB10 und Ultrafin 12. ....	103
Abb. 47: Übersicht der injizierten Flächen des Steinsalzes für die 4 Materialkombinationen. Diagramm 1: bGZ-Salzbeton und Wasserglas. Diagramm 2: bGZ-Salzbeton und Ultrafin 12. Diagramm 3: Magnesiabinder MB10 und Wasserglas Diagramm 4: Magnesiabinder MB10 und Ultrafin 12. ....	104
Abb. 48: Darstellung des in den geschädigten Bereich und das Steinsalz injizierten Injektionsmittels für die unterschiedlichen Materialkombinationen in Abhängigkeit des in den jeweiligen Probenkörper injizierten Volumens. ....	107

## Tabellenverzeichnis:

Tab. 1: Endlagerrelevante Eigenschaften potenzieller Wirtsgesteine[19].....	13
Tab. 2: Vorstellung der im Salinar am häufigsten vorkommenden leichtlöslichen Salzminerale .....	21
Tab. 3: Gehalte der gelösten Stoffe in IP21 Lösung und gesättigter NaCl-Lösung[56] .....	22
Tab. 4: Zusammenstellung von Baustoffen die für die Errichtung von Streckenverschlussbauwerken im Salinar prinzipiell zur Verfügung stehen (Nach[14]). .....	24
Tab. 5: Rezeptur für jeweils 1 m <sup>3</sup> des bGZ-Salzbetons sowie des Salzbetons M2 .....	25
Tab. 6: Rezeptur des Magnesiabinders MB10[60] .....	25
Tab. 7: Unterschiedliche Materialeigenschaften des Salzbetons M2 sowie des Magnesiabinders MB10. ....	26
Tab. 8: Ermittelte Zugfestigkeit von Salzbeton M2 sowie die Haftzugfestigkeit zwischen Steinsalz und dem Salzbeton M2 in Abhängigkeit des Abbindealters[26].....	31
Tab. 9: Zusammenstellung von Erfahrungsberichten zu Injektionsmaßnahmen, die im Kontakt mit Salz durchgeführt wurden. ....	35
Tab. 10: Zusammenstellung von In-Situ und Laborversuchen zur Untersuchung der Kontaktfuge sowie zu Anforderungen an Injektionsmittel und Baustoffe für den Einsatz im Salinar. ....	35
Tab. 11: Zusammenstellung der in den Literaturstellen angeführten Anforderungen an Baustoffe und Injektionsmittel für den Einsatz im Salinar. Die einzelnen Anforderungen wurden für eine verbesserte Übersichtlichkeit 5 übergeordneten Gruppen zugeordnet. ....	39
Tab. 12: Zusammenstellung der fünf ausgewählten Injektionsmittel.....	45
Tab. 13: Informationen zur Zusammensetzung und zum Mischungsverhältnis von „IM 4+“[62] .....	46
Tab. 14: Rheologische Daten von Ultrafin 12 bei unterschiedlichen Suspensionsdichten[63]. Die dargestellten Werte beziehen sich auf Suspensionen die mit Leitungswasser hergestellt wurden. ....	47
Tab. 15: Kennwerte von Natronwassergläsern mit verschiedenen Grädigkeiten [110]. ....	49
Tab. 16: Marshzeiten (in Sekunden) der Untersuchten Injektionsmittel.....	74
Tab. 17: Dichte der verschiedenen Injektionsmittel bei 30 und 40° C.....	75
Tab. 18: Mittelwerte und Einzelmesswerte der Kontaktwinkelmessungen. ....	78
Tab. 19: Wasserglas: Kontaktwinkel, Einzelmessungen und Mittelwerte .....	79
Tab. 20: Zusammenstellung der für die Berechnung der Eindringtiefe in eine horizontale, zylindrische Kapillare verwendeten rheologischen Materialkennwerte .....	81
Tab. 21: Übersicht der pro cm des Salzkerns injizierten Volumina des jeweiligen Injektionsmittels. Sowie die prozentuale Abweichung der unterschiedlichen Baustoffe des Streckenverschlussbauwerks, Injektionsmittel sowie den unterschiedlichen Kombinationen aus beiden Materialien zum Gesamt Durchschnitt (Dies entspricht dem Durchschnittswert aller Injektionsprobenkörper außer der Nummer 12, da hier eine Injektion über die gesamte Länge nicht möglich war) .....	94
Tab. 22: Tabellarische Auswertung des mit Ultrafin 12 injizierten Probenkörpers Nummer 2. ....	96

# 1 Einführung in den deutschen Endlagerbergbau

Mit der Entdeckung der Radioaktivität durch Henry Becquerel, sowie der Röntgenstrahlung durch W.C. Röntgen, öffnete sich Ende des 19. Jahrhunderts ein neues Feld für Forschung und Technik. Bereits wenige Jahre nach Ihrer Entdeckung wurde die Röntgenstrahlung erstmals in der Medizin zur Erstellung von Röntgenaufnahmen und zur Behandlung von Krebs eingesetzt[1]. Weitere Forschungen mit den neu entdeckten Strahlen zeigten, dass diese auch weitere Anwendung, wie z.B. zur Energieerzeugung und zur Waffenproduktion finden können. Im Jahr 1957 wurde der erste deutsche Kernreaktor zu Forschungszwecken in Betrieb genommen und 1966 ging in Rheinsberg in der DDR das erste kommerzielle Kernkraftwerk in Deutschland ans Netz. Nach dem Reaktorunfall in Fukushima wurde im Jahr 2011 von der Deutschen Bundesregierung der Ausstieg aus der Kernenergie beschlossen, wobei die bestehenden Atomkraftwerke bis zum Jahr 2022 schrittweise stillgelegt und anschließend rückgebaut werden sollen[2]. Bei der Nutzung der Kernenergie fallen bei der Herstellung der verwendeten Strahlenquellen aber auch beim Betrieb und Rückbau von kerntechnischen Anlagen Stoffe an, die keiner weiteren Verwertung zugefügt werden können, radioaktiv sind und daher einer gesonderten Entsorgung bedürfen. International wird die Endlagerung dieser Stoffe in tiefen geologischen Formationen als geeignetste Methode angesehen. In Deutschland gibt es derzeit zwei Bergwerke zur Endlagerung radioaktiver Materialien. Das ist zum einen die in der Nähe von Salzgitter gelegene Schachanlage Konrad, in der gemäß Planfeststilllegungsbeschluss schwach- und mittelradioaktive Abfälle eingelagert werden dürfen, und zum anderen das zwischen Magdeburg und Braunschweig gelegene Endlager Morsleben, welches sich genehmigungsrechtlich derzeit in der Planfeststellung zur Stilllegung befindet.

Das Ziel der gesonderten Entsorgung radioaktiver Materialien ist der Schutz von Mensch und Umwelt vor den beim Zerfall radioaktiven Materials freigesetzten ionisierenden Strahlen. Die emittierte Strahlung hat Reichweiten zwischen wenigen Zentimetern bis hin zu mehreren Metern. Sie hat, in Abhängigkeit der Dosis unterschiedliche Auswirkungen auf Lebewesen, die bei einer ausreichend hohen Dosis zum Tod führen können. Die besondere Gefährlichkeit, die von den radioaktiven Elementen ausgeht, besteht unter anderem darin, dass diese teilweise über Millionen von Jahren hinweg die ionisierende Strahlung abgeben und dass diese Strahlung für Menschen ohne technische Hilfsmittel nicht wahrnehmbar ist. Daher ist es wichtig die radioaktiven Abfallstoffe generationsübergreifend von der Hydro- und Geosphäre abgeschirmt zu lagern, damit keine Lebewesen der Strahlung ausgesetzt werden. Um das Ziel der dauerhaften Entsorgung sicherzustellen, wird die Entsorgung in tiefen geologischen Formationen als geeignete Methode zur Abgrenzung dieser Abfälle über lange Zeiträume von bis zu einer Million Jahren eingeschätzt.

Die anfallenden radioaktiven Abfälle gleich unterscheiden sich bezüglich ihrer Halbwertszeiten, der Art und der Energie der emittierten Strahlung. Die Wärmeentwicklung ist ein Charakterisierungsmerkmal, das insbesondere bei der Suche nach geeigneten Möglichkeiten zur Endlagerung betrachtet werden muss. Daher werden die in Deutschland anfallenden radioaktiven Abfälle, in zwei Gruppen unterteilt[3]:

**Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung:** „Der Begriff „radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung“ wurde im Rahmen der Planungsarbeiten für das Endlager Konrad quantifiziert. Diesen Arbeiten lag zugrunde, dass die untertage vorherrschenden Temperaturverhältnisse durch die endgelagerten Abfallgebinde nur unwesentlich beeinflusst werden sollten. Die Umsetzung dieser Planungsvorgabe führte zu der Festlegung, dass die durch die

*Zerfallswärme der in den Abfallgebinden enthaltenen Radionuklide verursachte Temperaturerhöhung des Wirtsgesteins im Mittel 3 Grad (Kelvin) nicht überschreiten darf. Dieser Wert entspricht der natürlichen Temperaturdifferenz bei einem Tiefenunterschied von 100 Meter in Bergwerken. Er ist - verglichen mit der durch die Bewetterung (Belüftung des Bergwerkes) verursachten Temperaturveränderung - gering. Das Wirtsgestein wird durch die kühlere zugeführte Luft aus der Bewetterung bereits deutlich größeren Temperaturschwankungen ausgesetzt. Die Temperaturdifferenz von 3 Kelvin entspricht einer mittleren Wärmeleistung von etwa 200 Watt je Kubikmeter Abfall.“ [3]*

**Wärmeentwickelnde Abfälle:** Wärmeentwickelnde Abfälle haben eine höhere Aktivitätskonzentration als die radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung und können eine Wärmeleistung von deutlich über 200 Watt pro Kubikmeter Abfall aufweisen [3].

Im internationalen Sprachgebrauch werden die wärmeentwickelnden Abfälle auch als HAW-Abfälle (high active waste) bezeichnet. Sowohl in Bezug auf das Volumen der Abfälle als auch bezüglich der Aktivität gibt es große Unterschiede zwischen den beiden Gruppen. Die für Deutschland insgesamt anfallenden etwa 28.000 Kubikmeter[4] (Abfallgebinde-Volumen) wärmeentwickelnde Abfälle weisen etwa 99,9 Prozent[5] der Aktivität der radioaktiven Abfälle auf. Die restlichen 0,1 % der Aktivität entfallen auf die vom Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BFE) bis zum Jahr 2080 erwarteten 304.000 Kubikmeter Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung[4]. Bei dieser Abschätzung werden keine Abfälle aus einer Rückholung aus der Schachanlage Asse II betrachtet, was zu einer deutlichen Erhöhung des anfallenden Abfallvolumens um bis zu 275.000 Kubikmeter führen kann[6].

## 1.1 Problemstellung der Arbeit

Den rechtlichen Rahmen für die Wiederverwertung sowie Beseitigung von Abfällen stellt das Kreislaufwirtschaftsgesetz dar. Allerdings gibt es einzelne Abfallgruppen, die von dieser Regelung ausgenommen sind, wie z.B. Kernbrennstoffe und sonstige radioaktive Stoffe im Sinne des Atomgesetzes (AtG). Gemäß § 9a Abs. 3 S.1 AtG ist der Bund verantwortlich für die Errichtung von Anlagen zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen, wobei das BFE als Antragssteller und Betreiber von Endlagern vorgesehen ist (§ 23 Abs. 1 Nr. 2 AtG). Wenn ein Standort für ein Endlager ausgewählt wurde, stellt das BFE beim Bundesland, in dem das Endlager liegt, einen Antrag auf Planfeststellung, wobei die für das Planfeststellungsverfahren zuständigen Behörden vom Landesrecht abhängig sind[5; 7]. Im Planfeststellungsverfahren wird im Wesentlichen die Vereinbarkeit des Vorhabens mit dem geltenden Recht geprüft. Wenn keine Beeinträchtigungen des Wohls der Allgemeinheit zu erwarten sind, wird ein Planfeststellungsbeschluss erlassen, der eine Reihe von Auflagen enthalten kann. Eine der zentralen Fragestellungen, die mit den im Planfeststellungsverfahren einzureichenden Unterlagen beantwortet werden muss, ist der Verschluss des Endlagers unter der Fragestellung des dauerhaften Strahlenschutzes. Der Verschluss des Endlagers soll durch eine Reihe von natürlichen und künstlichen Barrieren gewährleistet werden. Diese gilt es nach dem Stand von Wissenschaft und Technik zu errichten.

Eine der künstlichen Barrieren stellen Streckenverschlussbauwerke dar, die die horizontalen Verbindungsstrecken zwischen den Einlagerungsbereichen und den Schächten des Endlagerbergwerks nach der Einlagerung verschließen sollen. Durch die Errichtung der Streckenverschlussbauwerke soll ein möglicher Zufluss von Lösungen aus dem Bereich des Schachtes in die Einlagerungsbereiche sowie

ein möglicher späterer Austritt dieser gegebenenfalls kontaminierten Lösungen aus den Einlagerungsbereichen verhindert werden. Um diese Funktion ausüben zu können, müssen die Streckenverschlussbauwerke eine geringe querschnittsgemittelte Permeabilität aufweisen[8]. Diese drei Betrachtungsräume, die bei der Ermittlung der integralen Permeabilität herangezogen werden, sind der Baustoff des Streckenverschlussbauwerks, der Kontaktbereich zwischen Streckenverschlussbauwerk und dem Salzgebirge sowie die konturnahe Auflockerungszone.

Für die Errichtung von Streckenverschlussbauwerken stehen verschiedene Baustoffe zur Verfügung, wobei hydraulisch abbindende Baustoffe auf Zement- oder Magnesiumoxidbasis als geeignet erachtet werden. Jedoch können diese Baustoffe aufgrund verschiedener chemischer Prozesse während des Abbindens schwinden. Durch die Schwindprozesse im Baustoff des Streckenverschlussbauwerks kommt es zum Aufbau von Zugspannungen, die beim Überschreiten der Haftzugfestigkeit im Kontaktbereich zum Salzgebirge zur Bildung einer Kontaktfuge, und somit zur Ausbildung von Bereichen mit erhöhter Permeabilität führen können. Die Kontaktfuge wurde im Forschungsvorhaben CARLA [27] wie folgt definiert: „Als Kontaktfuge wird die Fläche bezeichnet, die durch die stoffliche Inhomogenität an der Grenze zwischen Bauwerk (Dammkörper) und Gebirge (in der Regel ALZ) gebildet wird. Sie kann sich als teilweise oder vollständig offener Spalt darstellen, sie kann durch teilweisen oder vollständigen adhäsiven Kontakt oder im Extremfall durch Reibungskontakt zwischen Gebirge und Baustoff gebildet werden. Sie kann auch durch einen injizierten oder anderweitig zwischen Bauwerk und Gebirge aufgetragenen weiteren Stoff ausgefüllt sein.“

Das Risiko der Entstehung von Bereichen mit erhöhter Permeabilität entlang des Kontaktbereichs zwischen dem Baustoff des Streckenverschlussbauwerks und dem Salzgebirge ist bei schwindenden Baustoffen am größten. Jedoch kann auch der Kontaktbereich zwischen Baustoff und Salzgebirge bei volumenexpansiven Materialien einen Bereich mit, im Vergleich zum intakten Salzgebirge und dem Baustoff des Streckenverschlussbauwerks, erhöhten Permeabilitäten aufweisen [101].

Bereiche mit erhöhten Permeabilitäten in Streckenverschlussbauwerken können, auch wenn diese lokal begrenzt sind, zu einer Verminderung der Wirksamkeit des Streckenverschlussbauwerks aus den folgenden Gründen führen:

- Nicht Erreichen des Permeabilitätszieles, da durch die lokal erhöhte Permeabilität die integrale Permeabilität (Baustoff, Kontaktbereich und ALZ) erhöht wird.
- Ansatzpunkt für angreifende Fluide und Korrosion des Baustoffes, wodurch es zu einer Beschädigung des Streckenverschlussbauwerks und einer Permeabilitätssteigerung kommen kann.

Da für Streckenverschlussbauwerke in Endlagerbergwerken sehr geringe integrale Permeabilitäten gefordert sind und es nicht zu einer Beeinträchtigung der Funktion des Streckenverschlussbauwerks infolge von Korrosionsprozessen kommen darf, müssen Bereiche mit lokal erhöhten Permeabilitäten injiziert werden. Unter der Injektion wird das Einpressen von viskosen, partikelgestützten oder partikelfreien Materialien verstanden, die aufgrund ihrer Korngröße und ihrer rheologischen Eigenschaften auch in Wegsamkeiten mit geringen Öffnungsweiten eindringen können und dort erhärten, wodurch die Durchlässigkeit für Gase und wässrige Lösungen reduziert wird.

Für die Injektion von Wegsamkeiten im Gebirge gibt es zahlreiche Baustoffe die routinemäßig im Tiefbau, Spezialtiefbau und Tunnelbau eingesetzt werden. Spezielle Materialien, die explizit für den Einsatz im Kontakt mit salinaren Lösungen und dem Salzgebirge entwickelt wurden, gibt es jedoch nur

wenige. Darüber hinaus gibt es durch den geplanten Einsatz im Endlagerbergbau weitere spezifische Anwendungsaufgaben, die in den obengenannten Einsatzbereichen durch die Injektionsmittel erfüllt werden müssen. Daher stehen wenige und nicht so umfangreich wie üblich erforschte Injektionsmittel für diese Aufgabenstellung zur Verfügung.

Aus diesem Grund gilt es, den Kenntnisstand über geeignete Injektionsmaterialien zu erhöhen. Zum einen im Rahmen von Messungen im Labor bei denen rheologische Kennwerte ermittelt werden und zum anderen bei anwendungsbezogenen Injektionsversuchen, die das Ziel haben, Informationen zum Eindringverhalten verschiedener Injektionsmittel zu erhalten. Das Eindringverhalten von Injektionsmitteln in den Kontaktbereich zwischen Streckenverschlussbauwerk und Salzgebirge wird nicht nur von den im Labor ermittelbaren rheologischen Kennwerten, sondern auch von standortabhängigen Kennwerten beeinflusst. Zu den standortabhängigen Kennwerten, die das Eindringverhalten der Injektionsmittel beeinflussen, zählen:

- die Öffnungsweite der Wegsamkeiten im Kontaktbereich
- die strukturelle Beschaffenheit der zu injizierenden Wegsamkeiten
- die vom Baustoff an das umliegende Gebirge abgegebene Feuchtigkeit
- chemische Interaktionen zwischen dem Injektionsmittel, dem anstehenden Salz und dem Baustoff des Streckenverschlussbauwerks

Daher sind neben Laborversuchen auch anwendungsbezogene Injektionsversuche mit den geeigneten Injektionsmaterialien im Kontakt mit üblichen Baustoffen für Streckenverschlussbauwerke und Steinsalz von Bedeutung, um das Eindringverhalten beurteilen zu können. Dies gilt insbesondere für Injektionsmaterialien wie das Wasserglas, die im Kontakt mit Steinsalz in neuartigen Injektionsverfahren erprobt werden (einphasig ohne Härtemittel). Daher sollen im Rahmen dieser Arbeit sowohl Laborversuche als auch Injektionsversuche durchgeführt werden, wobei die folgenden Zielstellungen nähergehend betrachtet werden:

- Erfassung wichtiger rheologischer Materialkennwerte ausgewählter Injektionsmaterialien unter Laborbedingungen für bergbautypische Temperaturen von 30 bzw. 40° C
- Ermittlung des theoretischen Eindringverhaltens in Wegsamkeiten mit geringen Öffnungsweiten basierend auf den ermittelten rheologischen Kennwerten.
- Erweiterung des Kenntnisstandes zum Einfluss des Abbindeverhaltens ausgewählter Baustoffe für Streckenverschlussbauwerke auf MgO- und Zementbasis auf die Ausbildung eines geschädigten Kontaktbereichs zwischen Baustoff und Steinsalz im Spaltzugversuch.
- Vergleich unterschiedlich ausgebildeter Kontaktfugen hinsichtlich des Eindringverhaltens von Injektionsmitteln im Kontaktbereich zwischen Sorelbeton bzw. Salzbeton und Steinsalz.
- Vertiefung des Kenntnisstandes zu Natronwasserglasinjektionen als Einphaseninjektion im Kontakt mit Steinsalz, insbesondere des Eindringverhaltens.

Um diese Zielstellungen untersuchen zu können, werden zu Beginn Anforderungen an Injektionsmittel zur Injektion von Wegsamkeiten im Kontaktbereich zwischen Baustoffen für Streckenverschlussbauwerke und dem Salzgebirge in Endlagerbergwerken erarbeitet, anhand derer nachfolgend als geeignet erachtete Injektionsmittel ausgewählt werden. Für die ausgewählten Injektionsmittel werden rheologischen Kennwerte im Labor ermittelt, anhand derer das theoretische Eindringverhalten berechnet wird. Das theoretische Eindringverhalten dient nachfolgend der Auswahl

von Injektionsmitteln für die anwendungsbezogenen Injektionsversuche an einer künstlich mittels Spaltzugversuch erzeugten Kontaktfuge.

Nur durch den Einsatz von Baustoffen, die die anwendungsspezifischen Anforderungen erfüllen, kann es gelingen, Wegsamkeiten mit geringen Öffnungsweiten im Bereich der Kontaktzone zwischen Streckenverschlussbauwerk und Salzgebirge zu injizieren und somit eine Reduzierung der Permeabilität in dem Kontaktbereich zu erreichen und damit einhergehend auch die integrale Permeabilität des Streckenverschlussbauwerks zu reduzieren. Nur durch ausreichend geringe integrale Permeabilitäten kann die Wirksamkeit der Streckenverschlussbauwerke auch über die langen, geforderten Bemessungszeiträume sichergestellt werden. Durch die Verbesserung der Kenntnisse der rheologischen Eigenschaften und des Eindringverhaltens im Kontakt mit für Streckenverschlussbauwerken üblichen Baustoffen sowie Steinsalz ist es möglich, geeignete Materialien zur Injektion und Permeabilitätsverringerung im Kontaktbereich zwischen Streckenverschlussbauwerk und Salzgebirge zu identifizieren.

## 2. Aufbau eines Endlagers

Um eine Freisetzung von Radioaktivität aus einem Endlager in die Biosphäre auch für lange Zeiträume von einer Million Jahren zu verhindern, wird die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen als geeignet angesehen. Aufgrund ihrer guten abdichtenden Eigenschaften und geringen Permeabilitäten eignen sich hierfür besonders Steinsalz-, Tonstein- oder Kristallinvorkommen (z.B. Granit) als Wirtsgestein für das Endlagerbergwerk. Nachdem die Auswahl eines Standortes für das HAW Endlager erfolgt ist, wird das für die Einlagerung der Abfälle notwendige Grubengebäude erstellt. Dieses besteht aus Schächten, Strecken sowie den Einlagerungsbereichen. Unabhängig von der Art des Wirtsgesteins wird der sichere Einschluss der eingelagerten Abfälle über eine Reihe von Barrieren sichergestellt. Dies sind die Abfallbehälter als technische Barriere, die geotechnischen Barrieren sowie die geologische Barriere. Als geotechnische Barrieren werden sowohl die Schacht- als auch Streckenverschlüsse bezeichnet, wobei die Streckenverschlüsse weiter untergliedert werden können in das Streckenverschlussbauwerk und den eingebrachten Salzgrusversatz. In Abb. 1 sind der prinzipielle Aufbau eines Endlagers, sowie die unterschiedlichen Barrieren dargestellt.

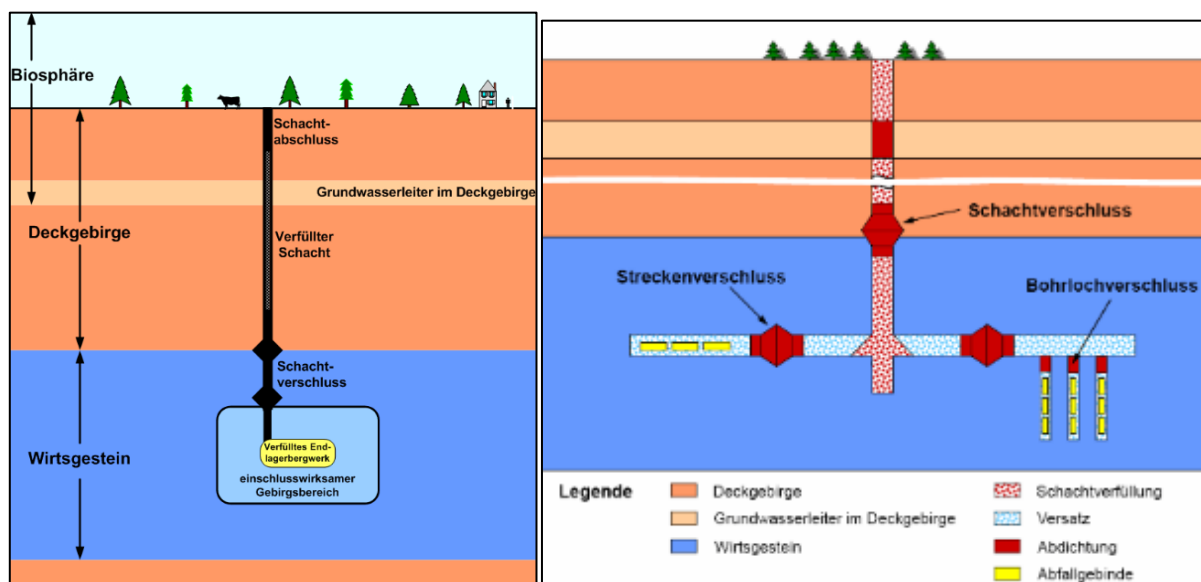


Abb. 1: Links: Lage von Deckgebirge, Wirtsgestein, einschlusswirksamem Gebirgsbereich und Endlagerbergwerk zueinander. Rechts: Schematische Übersicht der einzelnen Barrieren eines Endlagers[5].

### 2.1 Mögliche Wirtsgesteine

Dem Wirtsgestein des Endlagers, in dem der einschlusswirksame Gebirgsbereich liegt, kommt die Aufgabe zu, über geologische Zeiträume den sicheren Einschluss der eingelagerten Abfälle zu gewährleisten[16].

International sind drei verschiedene Wirtsgesteine für die Errichtung von HAW Endlagern anerkannt, die jeweils sehr unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Als geeignet werden die in Tab. 1 aufgeführten Gesteine Steinsalz, Ton/Tonstein sowie Kristallingestein (z.B. Granit) angesehen. Alle drei Wirtsgesteine sind im Grundsatz geeignet, den sicheren Einschluss von radioaktiven Abfällen zu gewährleisten, jedoch unterscheiden sie sich hinsichtlich einzelner Eigenschaften, was bei der Einlagerung oder der Errichtung der Grubenbaue des Endlagerbergwerks zu beachten ist.



Tab. 1: Endlagerrelevante Eigenschaften potenzieller Wirtsgesteine[19]

<i>Eigenschaft</i>	<i>Steinsalz</i>	<i>Ton/Tonstein</i>	<i>Kristallingestein (z. B. Granit)</i>
Temperaturleitfähigkeit	hoch	gering	mittel
Durchlässigkeit	praktisch undurchlässig	sehr gering bis gering	sehr gering (ungeklüftet) bis durchlässig (geklüftet)
Festigkeit	mittel	gering bis mittel	hoch
Verformungsverhalten	viskos (Kriechen)	plastisch bis spröde	spröde
Hohlraumstabilität	Eigenstabilität	Ausbau notwendig	hoch (ungeklüftet) bis gering (stark geklüftet)
In-situ Spannungen	lithostatisch isotrop	anisotrop	anisotrop
Lösungsverhalten	hoch	sehr gering	sehr gering
Sorptionsverhalten	sehr gering	sehr hoch	mittel bis hoch
Temperaturbelastbarkeit	hoch	gering	hoch

günstige Eigenschaft
  ungünstige Eigenschaft
  mittel

Die Auswahl des Wirtsgesteins für ein Endlager erfolgt oftmals anhand der landestypischen geologischen Gegebenheiten. So stellt die Endlagerung im Kristallin in Deutschland eine große Herausforderung dar, da es kaum ausreichend große, zusammenhängende geeignete Flächen dieses Gesteins gibt. Sowohl Tonstein als auch Steinsalz kommen in Deutschland in großflächigen, homogenen Formationen, die eine Endlagerung ermöglichen, vor. Beide Gesteinsformationen werden hinsichtlich der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle eingehend untersucht.

Aufgrund der langjährigen Erfahrungen mit dem Wirtsgestein Steinsalz infolge der in Deutschland seit über einem Jahrhundert andauernden Gewinnung von Kali- und Steinsalz in Bergwerken herrscht ein sehr guter Kenntnisstand hinsichtlich der Materialparameter dieses Wirtsgesteins, sowie bezüglich der technischen Handhabung der Auffahrung und Aufrechterhaltung von Grubenbauen. Zudem wurde durch die am Standort Gorleben sowie auf der Schachanlage Asse 2 durchgeführten Forschungsarbeiten ein umfangreicher Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich der Endlagerung im Steinsalz erreicht. Gemäß Aussage in [107] besteht bezüglich des langzeitsicheren Verschlusses des Endlagers in der Nachbetriebsphase noch Forschungsbedarf.

## 2.2 Grubengebäude

Der Aufbau eines Endlagers ist in einigen Aspekten ähnlich zu einem Bergwerk, das der Rohstoffgewinnung dient. Für Material- und Personentransport sowie zur Bewetterung werden mindestens zwei Tagesschächte benötigt. Die Tagesschächte sind untertägig an die Füllörter angeschlossen, und von hieraus werden die restlichen Grubenbaue angebunden. Dies sind sowohl die Infrastrukturbereiche als auch die Zugangsstrecken zu den Einlagerungsbereichen. Der Einlagerungsbereich unterscheidet das Endlagerbergwerk vom Gewinnungsbergwerk. Die hier aufgefahrenen Grubenräume dienen nicht der Rohstoffgewinnung, sondern dienen der Einlagerung der Gebinde mit den radioaktiven Abfällen. Zur Einlagerung können sowohl horizontale Strecken als auch vertikale Einlagerungsbohrlöcher eingesetzt werden [99]. In Abb. 2 ist beispielhaft der Aufbau eines Endlagerbergwerks mit Strecken und Bohrlochlagerung in einem Salzstock dargestellt.

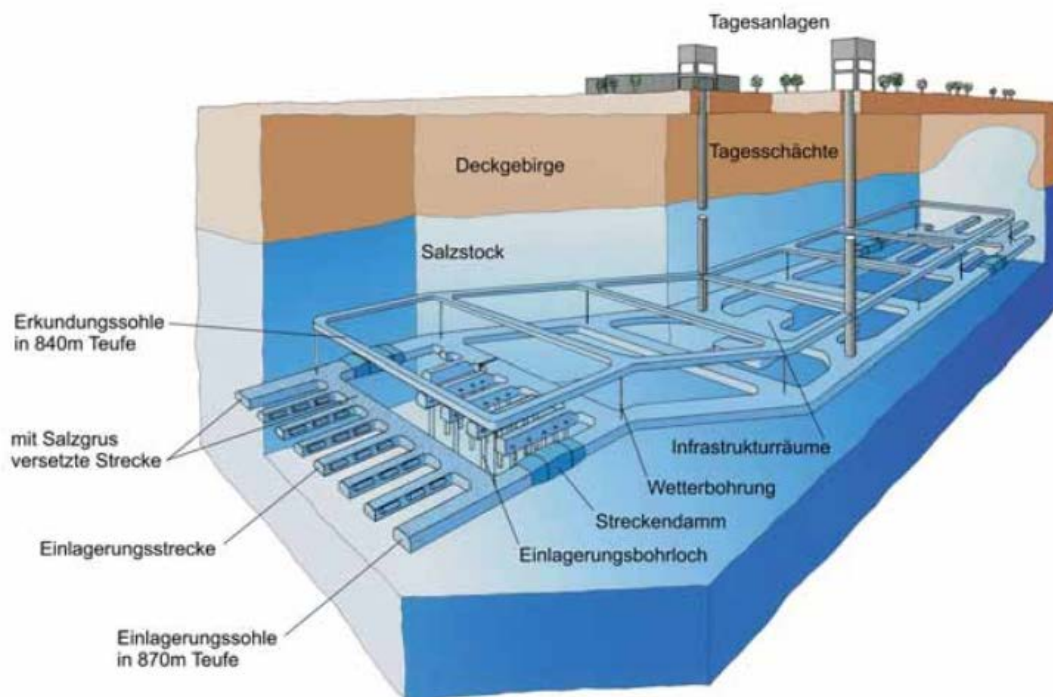


Abb. 2: Aufbau eines Endlagerbergwerks[13].

Nach der Einlagerung der Abfallgebinde werden die Zwickelräume zwischen den Gebinden und dem umliegenden Gebirge mit Salzgrus verfüllt. Als Salzgrus wird gebrochenes Salz mit einer Korngröße von wenigen Millimetern bezeichnet. Im Anschluss an die Verfüllung des Einlagerungsbereichs mit Salzgrus werden in den Verbindungsstrecken zwischen Schacht und Einlagerungsbereichen an ausgewählten Standorten Streckenverschlussbauwerke errichtet. Im weiteren Verlauf der Stilllegung des Endlagerbergwerks werden die restlichen Hohlraumvolumina im Grubengebäude mit Salzgrus versetzt. Als letzter Schritt werden in den beiden Schächten Schachtverschlüsse errichtet, wodurch die Zugänge in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich aus dem Deckgebirge verschlossen werden[107].

Das Versetzen der Zugangsstrecken sowie die Errichtung der Strecken- und Schachtverschlüsse ist Teil der Umsetzung des Mehrbarrierensystems, dass den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle über geologische Zeiträume realisieren soll.

## 2.3 Mehrbarrierensystem – Barrieren eines Endlagers

In Endlagern für HAW-Abfälle soll durch mehrere Barrieren der sichere Einschluss der Abfälle gewährleistet werden. Die Barrieren befinden sich sowohl im Grubengebäude des Endlagerbergwerks als auch zwischen dem Endlagerbergwerk und dem Deck- und Nebengesteinsschichten. Durch den Einsatz mehrerer Barrieren mit unterschiedlichen Wirkprinzipien, eingesetzten Materialien und Funktionszeiträumen, wird im Sinne der Diversität und Redundanz ein hohes Maß an Sicherheit generiert. Damit ein Zutritt von Lösungen in das Endlager oder aus dem Endlager hinaus möglich ist, müssten eine oder mehrere Barrieren in ihrer Funktion beeinträchtigt sein. Eine Freisetzung von Radionukliden ist somit nur bei einer gestörten Entwicklung des Endlagers möglich [99].

Damit die einzelnen Barrieren des Mehrbarrierensystems ihre Funktion erfüllen können, müssen diese nachfolgende grundsätzliche Anforderungen erfüllen [24]:

- Durch die Barrieren muss sichergestellt werden, dass aus dem Endlager kein unzulässiger Austritt radioaktiver Stoffe in die Biosphäre erfolgt. Im Hinblick auf mögliche Schwächungen einzelner Barrieren sowie realistischer Weise anzunehmende Veränderungen ihrer Wirksamkeit, muss das Mehrbarrierensystem insgesamt ausreichende Sicherheitsreserven aufweisen.
- Die Wirksamkeit der Barrieren darf nicht von einer Instandhaltung oder von Kontrollen bzw. Instandhaltungsmaßnahmen in der Nachbetriebsphase abhängen.
- Das Endlager ist am Ende der Betriebsphase stillzulegen. Es ist ein Verfüll- und Verschleißkonzept zu erstellen, das die Anforderungen, die sich insbesondere aus der Standsicherheit und der Langzeitsicherheit ergeben, erfüllt.
- Der Antragssteller hat die Barrierenwirksamkeit der technischen Barrieren in einer Langzeitprognose unter Berücksichtigung der in der geologischen Langzeitprognose ermittelten Entwicklung des geologischen Barrierensystems zu beschreiben und zu bewerten.

Das Mehrbarrierensystem setzt sich aus insgesamt aus vier Barrieren zusammen:

- die geologische Barriere,
- die geotechnischen Barrieren,
- der in das Grubengebäude eingebrachte Salzgrusversatz
- die technischen Barrieren.

Die unterschiedlichen Barrieren werden nachfolgend näher beschrieben.

### **Geologische Barriere:**

Die geologische Barriere besteht aus dem das Endlager umgebenden undurchlässigen Gesteinspaket. Bei der Endlagerung im Salz kann die geologische Barriere auch als Salzbarriere bezeichnet werden. Die äußere Begrenzung der Salzbarriere ist der Übergang zum als durchlässig und ggf. lösungsführend anzunehmenden Deck- und Nebengebirge [107]. Durch die geologische Barriere soll das Eindringen von Fluiden aus dem Deck- und Nebengebirge in das Endlagerbergwerk sowie ggf. das Austreten von kontaminierten Lösungen oder Gasen in die Biosphäre verhindert werden [107].

### **Salzgrusversatz:**

Als Salzgrus wird gebrochenes Salz bezeichnet, das üblicherweise bei der Streckenauffahrung mittels Teilschnittmaschinen anfällt und eine Korngröße im Millimeterbereich bis hin zu wenigen Zentimetern aufweist. Der Salzgrusversatz wird nicht als geotechnische Barriere bezeichnet, jedoch gewährleistet der Versatz den langfristigen Verschluss der Verbindungsstrecken zwischen den Einlagerungsbereichen und den Schächten des Endlagerbergwerks. Der langfristige Einschluss wird durch eine zeitabhängige Verringerung der Porosität und Permeabilität durch die auf den Salzgrusversatz einwirkende Konvergenz erreicht. Dies führt dazu, dass der Salzgrus langfristig die gleichen abdichtenden Eigenschaften wie Steinsalz aufweist, weswegen der Salzgrus als wirksamer Bestandteil der geologischen Barriere betrachtet wird [108]. Zusätzlich zur langfristigen Dichtfunktion kommen dem Salzgrusversatz weitere Aufgaben zu. Durch die Einbringung des Salzgrusversatzes wird das Hohlraumvolumen im Grubengebäude signifikant reduziert, wodurch die geologische Barriere mechanisch stabilisiert wird, und somit langfristig ihre Integrität erhält [24, 99]. In Situ Versuche zeigen, dass der sichere Einschluss mit Salzgrus als Versatzmaterial realisierbar ist [108].

### **Technische Barrieren:**

Die Endlagerbehälter, in denen die HAW Abfälle eingelagert werden, stellen die technische Barriere dar [108]. Die Endlagerbehälter müssen lediglich für den Zeitraum, bis die Wirksamkeit anderer Barrieren gegeben ist, die geforderte Schutzfunktion gewährleisten. Im Wesentlichen dienen die Endlagerbehälter (Technische Barriere) somit der sicheren Handhabung der Abfälle während der Betriebsphase [99].

### **Geotechnische Barrieren:**

Beim Abteufen der Schächte werden lokal die geologischen Barrieren des Endlagerbergwerks durchörtet und somit in ihrer Funktion beeinträchtigt [15]. Im Übergangszeitraum bis die geologische Barriere wieder intakt ist, kommt den geotechnischen Barrieren die Aufgabe des Abdichtens der eingelagerten Abfälle gegen Zuflüsse von der Biosphäre zu [5].

Als geotechnische Barrieren werden die Streckenverschlussbauwerke sowie die Schachtverschlussbauwerke bezeichnet. Diese Bauwerke werden nach der Einlagerung der HAW Abfälle im Rückbau errichtet. Der Schachtverschluss soll die Unversehrtheit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs widerherstellen und den Zutritt von Deckgebirgslösungen in das Grubengebäude hinein sowie ggf. den Austritt von Lösungen und Gasen aus dem Grubengebäude in die Biosphäre verhindern [108].

Die Streckenverschlussbauwerke haben die Aufgabe, den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle bis zum Zeitpunkt, ab dem der Salzgrusversatz hinreichend kompaktiert ist und den sicheren Einschluss der Abfälle ermöglicht zu gewährleisten [108]. Somit kommt den Streckenverschlussbauwerken die Aufgabe der Abdichtung zu, bis zu dem Zeitpunkt, ab dem die Langzeitdichtelemente in den Strecken (Salzgrus) funktional sind. Das bedeutet, dass insbesondere in den ersten Jahrhunderten bis Jahrtausenden nach der Einlagerung der Abfälle der sichere Einschluss der Abfälle im wesentlichen Maße durch die Funktionstüchtigkeit der Streckenverschlussbauwerke erreicht wird.

### **3. Geotechnische Barrieren - Streckenverschlussbauwerke**

Im Folgenden wird näher auf die geotechnischen Barrieren eingegangen.

Die geotechnischen Barrieren haben zusammen mit dem Versatz in den Strecken zwischen Einlagerungsbereich und den Schächten des Endlagerbergwerks die Aufgabe, den Zutritt von Lösungen über den Schacht und die Strecken zu den endgelagerten Abfällen sowie die Migration von ausgepressten, gegebenenfalls kontaminierten Lösungen zu verhindern [99].

Da der Salzgrus infolge der Konvergenz nach einem gewissen Zeitraum vergleichbare Eigenschaften wie Steinsalz aufweist, müssen die Streckenverschlussbauwerke den sicheren Einschluss der Abfälle lediglich im Zeitraum bis zum Erreichen des sicheren Einschlusses durch den nach hinreichender Kompaktion als technisch dicht erachteten Salzgrusversatz gewährleisten (ungestörte Endlagerentwicklung) [108]. Im Falle einer gestörten Endlagerentwicklung kommt es zu einem Laugenzutritt an die eingelagerten Abfälle, bevor der Salzgrus hinreichend kompaktiert wurde [108].

Damit der sichere Einschluss der eingelagerten Abfälle sowohl bei einer gestörten als auch bei einer ungestörten Entwicklung des Endlagers gewährleistet ist, müssen die Streckenverschlussbauwerke eine Reihe von Anforderungen erfüllen.

#### **3.1 Anforderungen an Streckenverschlussbauwerke**

Das Forschungsvorhaben ISIBEL diente der Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW. Hauptsächlich diente das Projekt dazu, basierend auf dem Stand von Wissenschaft und Technik zu bewerten, inwieweit die Nachweise zur technischen Realisierbarkeit sowie der Endlagersicherheit geführt werden können. Im Rahmen von ISIBEL wurden an die im Endlagerbergwerk zu errichtenden Streckenverschlussbauwerke Anforderungen gestellt. Die aufgestellten Anforderungen definieren Rahmenbedingungen, die bei der Errichtung von Streckenverschlussbauwerken Beachtung finden müssen, damit diese funktionstüchtig sind. Die im Forschungsvorhaben ISIBEL aufgeführten Anforderungen wurden zur besseren Übersicht gruppiert. Nachfolgend sind die in den sechs Gruppen zusammengestellten Anforderungen an Streckenverschlussbauwerke aufgeführt:

##### **Allgemeine Anforderungen**

- Diversität: Das Streckenverschlussbauwerk soll aus einem oder mehreren Dichtelementen bestehen, deren Art, Position und eingesetzten Baumaterialien in Abhängigkeit der Standortbedingungen abzustimmen sind [99].
- Bidirektionalität: Das Bauwerk muss sowohl gegenüber aus dem Schachtbereich als auch gegenüber aus dem Endlagerbereich zutretenden Fluiden dicht sein [108].
- Langfristig immer sicherer Zustand hinsichtlich Dichtigkeit und Standsicherheit (positiv überkritisches Verhalten) [24].

### **Anforderungen an den Funktionszeitraum**

- Die Gewährleistung der Funktion ist über den gesamten Bemessungszeitraum nachzuweisen. Die Dauer des Bemessungszeitraumes der Streckenverschlüsse ist abhängig vom Zeitpunkt des Erreichens einer hinreichenden Kompaktion des Salzgruses (dieser gewährleistet den sicheren Einschluss der Abfälle). Der Bemessungszeitraum ist derzeit noch offen und wird mit dem gegenwärtigen Kenntnisstand dem Nachweiszeitraum gleichgesetzt [108].
- Das Streckenverschlussbauwerk muss möglichst frühzeitig während der Betriebsphase errichtet werden, um zu Beginn der Nachbetriebsphase die Funktionalität gewährleisten zu können [24].
- Für jede Barriere muss im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse der Nachweis der Dauerhaftigkeit geführt werden [99].

### **Anforderungen an die Herstellung**

- Mindestlänge für Barrieren: 15 Meter. Die Länge ist abhängig von den geologischen Verhältnissen im Einlagerungsbereich [99].
- Das Streckenverschlussbauwerk muss ein statisches Widerlager zur Aufnahme von horizontalen Drücken sowie des Gebirgsdruckes aufweisen [99].
- Das Streckenverschlussbauwerk muss im Rückbau (einseitiger Zugang) erstellbar sein [24].
- Erstellbarkeit in einem qualitätsgesicherten Verfahren zur Gewährleistung der Standsicherheit und technisch dichten Herstellung [24].
- Einfache Wirkprinzipien der Bauteile [24].
- Erprobte Komponenten/ Bauteile [24].
- Wartungsfreie Auslegung [24].

### **Mechanische Anforderungen**

- Für jede geotechnische Barriere muss im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse der Nachweis der Standsicherheit sowie der Rissbeschränkung geführt werden [99].
- Mechanische Standsicherheit gegenüber dem Gebirgsdruck [24], [108].
- Mechanische Standsicherheit gegenüber zutretenden Lösungen [24], [108].
  - o Maximaler biosphäreseitige Fluidruck = hydrostatischer Laugendruck [108].
  - o Maximaler endlagerseitiger Laugendruck (theoretisch; bei impermeablen Verschluss) = Petrostatischer Druck [108].

### **Anforderungen an den Hydraulischen Widerstand (Permeabilität)**

- Die Vorgaben an den hydraulischen Widerstand der Barriere werden anhand von Radionuklidtransportberechnungen, die im Rahmen der radiologischen Langzeitsicherheitsanalyse durchgeführt werden, ermittelt [99].
- Die Anforderungen an den erforderlichen hydraulischen Widerstand sowie die Lebensdauer der Schacht- und Streckenverschlüsse ergeben sich aus dem Kompaktionsverhalten des in den Strecken eingebrachten Salzgrusversatzes [99].
- Bidirektionalität: Das Bauwerk muss sowohl gegenüber aus dem Schachtbereich als auch aus dem Endlagerbereich zutretenden Fluiden dicht sein [108].
- Technisch dicht gegenüber Lösungen (im Störfallszenario) [24].

- Bei einer ungestörten Endlagerentwicklung ergeben sich nach dem Ende der Versatzkompaktion keine Anforderungen an die Dichtwirkung des Streckenverschlussbauwerks [108].
- Im Falle einer gestörten Entwicklung (kein sicherer Einschluss/ Laugenzutritt an die Abfälle) sind durch die hydraulischen Widerstände der Strecken- und Schachtverschlüsse die Volumenströme an kontaminierter Lauge derart zu minimieren, dass die radiologischen Schutzziele über den gesamten Nachweiszeitraum eingehalten werden [108].

### Chemische Anforderungen

- Die eingesetzten Baustoffe müssen unter den im Endlager herrschenden Bedingungen langfristig beständig sein [99], [24].
- Langzeitbeständigkeit der Baumaterialien gegenüber korrosiven Lösungen und Gasen [24].

Neben den Anforderungen an die Errichtung sowie die Materialeigenschaften des Streckenverschlussbauwerks beeinträchtigen auch die Auswahl des Bauwerksstandorts sowie dessen Aufbau maßgeblich das Erreichen des sicheren Einschlusses der eingelagerten Abfälle im Zeitraum bis zum Erreichen der Dichtigkeit des Salzgrusversatzes. Daher können detailliertere Anforderungen an die geotechnischen Barrieren erst aufgestellt werden, wenn die Salzgruskompaktion hinreichend bekannt und prognostizierbar ist, sowie die Verhältnisse am Barrierenstandort nähergehend bekannt sind [108].

### 3.2 Aufbau eines Streckenverschlussbauwerks

Da der Aufbau des Streckenverschlusses abhängig von den Standortbedingungen ist, wurde bisher noch kein detailliertes technisches Konzept für einen Streckenverschluss in einem HAW Endlager festgelegt [108]. Basierend auf den oben genannten Anforderungen lässt sich jedoch der in Abb. 3 dargestellte, vereinfachte Aufbau eines Streckenverschlussbauwerks ableiten.

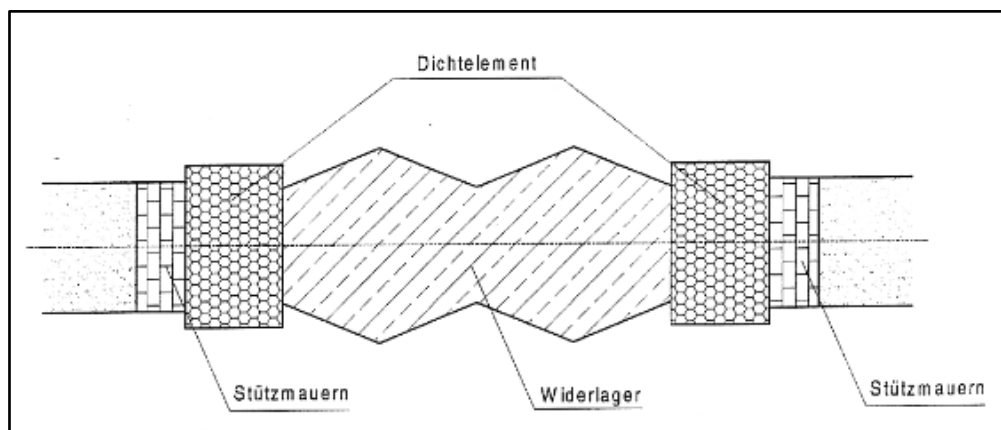


Abb. 3: Vereinfachtes Prinzip eines Streckenverschlussbauwerks mit den einzelnen Funktionselementen[24].

Streckenverschlussbauwerke bestehen, wie in Abb. 3 dargestellt, aus zwei wesentlichen Funktionselementen. Dies sind zum einen das Widerlager, das im Falle eines Druckanstieges auf einer Seite des Bauwerks die Lagestabilität des Bauwerks gewährleistet und zum anderen die Dichtelemente, die zur Abdichtung der Strecke gegenüber migrierenden Lösungen oder Gasen dienen. Im Sinne der Diversität und Redundanz sollen die Dichtelemente aus zwei verschiedenen Baustoffen hergestellt werden. Hierzu können kombinierte Widerlager/Dichtelemente aus Salzbeton oder Sorelbeton mit

reinen Dichtelementen aus Bitumen oder Bentonit kombiniert werden [14; 15]. Einzelne Baustoffe, wie z.B. Salzbeton oder Sorelbeton, können zur Herstellung kombinierter Funktionselemente eingesetzt werden, d.h. sie dienen gleichzeitig als Widerlager und als Dichtelement. Auf die möglichen Baustoffe wird nachfolgend im Kapitel 3.3.2 eingegangen.

### 3.3 Integrale Permeabilität/ Strömungsräume

Die hydraulischen Anforderungen an die technischen und geotechnischen Barrieren werden anhand von Stofftransportberechnungen erarbeitet, die im Rahmen der radiologischen Langzeitsicherheitsanalyse durchgeführt werden. Hierbei wird der Strömungswiderstand der jeweiligen Barrieren ermittelt, der zur Einhaltung des radiologischen Schutzzieles nötig ist [108].

Der Strömungswiderstand der Barriere ist abhängig von der Querschnittsfläche, der Länge sowie der Permeabilität. Bei der Betrachtung der Querschnittsfläche ist zu beachten, dass diese sich aus drei Strömungsräumen zusammensetzt (Baustoff des Streckenverschlusses, Kontaktzone zum Salzgebirge sowie der Auflockerungszone im Gebirge). Zur Berechnung des Strömungswiderstandes wird die querschnittsgemittelte Permeabilität des Streckenverschlussbauwerkes herangezogen, jedoch muss auch für jeden einzelnen Strömungsraum der Nachweis eines ausreichenden hydraulischen Widerstandes geführt werden [108].

Die Untergliederung der hydraulisch relevanten Querschnittsfläche in drei Abschnitte erfolgte auch bei der Nachweisführung der Abdichtbauwerke im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens für die Stilllegung des Endlagers Morsleben[8]. Für die Modellierungen wurden die folgenden drei Strömungsräume betrachtet:

- das Dichtelement aus hydraulisch abbindenden Baustoffen
- die Auflockerungszone im Salz
- die Kontaktzone zwischen Salzbetonkörper und Streckenkontur

Aus den Querschnittsflächen, sowie der Permeabilität der jeweiligen Strömungsräume erfolgt mit der untenstehenden Formel die Berechnung der integralen, d.h. querschnittsgemittelten Permeabilität des Streckenverschlussbauwerks[100]:

$$k_{integral} = \frac{k_D * A_D + k_K * A_K + k_{ALZ} * A_{ALZ}}{A_D + A_K + A_{ALZ}}$$

$K_{integral}$  = Integrale Permeabilität

$K_d$  = Permeabilität des Dichtelements

$K_k$  = Permeabilität des Kontaktbereichs

$K_{ALZ}$  = Permeabilität der Auflockerungszone

$A_D$  = durchströmte Querschnittsfläche des Dichtelements

$A_K$  = durchströmte Querschnittsfläche des Kontaktbereichs

$A_{ALZ}$  = durchströmte Querschnittsfläche der Auflockerungszone

Die Dichtigkeit des Bauwerks gegenüber Lösungen und somit auch dessen Funktionalität hängt vom Zusammenwirken der einzelnen Strömungsräume des Streckenverschlussbauwerks ab. Selbst wenn nur einer der Bereiche umläufig ist, verliert das Streckenverschlussbauwerk seine Funktion. Im Folgenden werden die drei Strömungsräume näher beschrieben und es wird auf den Stand von



Wissenschaft und Technik hinsichtlich des Erreichens einer ausreichend geringen Permeabilität in dem jeweiligen Strömungsraum eingegangen.

### 3.3.1 Salzgebirge

Bei der Endlagerung im Salinar dienen die Evaporitminerale des Salzgebirges als einschlusswirksamer Gebirgsbereich, in dem die Hohlräume des Endlagerbergwerks aufgefahren und die Abfälle eingeschlossen werden. Beim Verschließen der Zugangsstrecken mittels Streckenverschlussbauwerken müssen einige Materialeigenschaften des Salzgebirges beachtet werden, damit das Streckenverschlussbauwerk seine Funktionalität erreicht. Das Salzgebirge setzt sich aus unterschiedlichen Sulfaten und Chloriden zusammen, die meist Kalium, Natrium und Magnesium enthalten. Die am häufigsten auftretenden Evaporitminerale des Salzgebirges sind in Tab. 2 zusammengestellt. Im Salinar können neben den Evaporitmineralen, welche durch unterschiedliche Löslichkeiten gekennzeichnet sind, auch Tone, Karbonate und Siliziklastika vorkommen.

Tab. 2: Vorstellung der im Salinar am häufigsten vorkommenden leichtlöslichen Salzminerale.

Mineralname	Chemische Zusammensetzung	Löslichkeit [g/l] bei 20° C	Deliqueszenz-feuchtigkeit	Lösungsstabilität im Kontakt mit	
				IP21-Lösung	NaCl-gesättigter Lösung
Carnallit	$\text{KMgCl}_3 \times 6 \text{ H}_2\text{O}$			X	
Kieserit	$\text{MgSO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$	755 {[57]}	42 % {[57]}		
Kainit	$\text{KMg}(\text{ClSO}_4) \times 3 \text{ H}_2\text{O}$			X	
Halit	$\text{NaCl}$	357	75,4 % {[58]}	X	X
Anhydrit	$\text{CaSO}_4$	2			
Sylvin	$\text{KCl}$	347	85 % {[58]}	X	

Die Auflistung gibt lediglich einen Überblick über die am häufigsten vorkommenden Evaporitminerale. Standortabhängig ist bei der Planung der Streckenverschlussbauwerke die Mineralogie am Einbaustandort zu untersuchen, wobei insbesondere auf das Vorhandensein von leichtlöslichen Kalisalzen zu achten ist.

Das Salzgebirge weist einige besondere Materialeigenschaften auf, die bei der Errichtung des Streckenverschlussbauwerks berücksichtigt werden müssen, um eine möglichst geringe integrale Permeabilität realisieren zu können:

- Teilweise gute bis sehr hohe Löslichkeiten der Evaporitminerale in Abhängigkeit der Zusammensetzung zutretender Lösungen
- Plastisches Materialverhalten und Ausbildung von aufgelockerten Gebirgsbereichen um aufgefahrene Hohlräume
- Teilweise niedrige Deliqueszenzfeuchtigkeit der Salzminerale

#### Löslichkeit

Die Mehrzahl der üblicherweise im Salzgebirge vorkommenden Salzminerale ist in Wasser gut löslich. Soweit in der Literatur verfügbar sind in Tab. 2 die Löslichkeiten einiger typischen Salzminerale angegeben. Aufgrund der guten Löslichkeit besteht im Falle des Zutritts von in Bezug auf die am Barrierenstandort vorkommenden Salzminerale untersättigten Lösungen die Gefahr, dass es infolge von Lösungs- und Umkristallisationsprozesse zur Bildung von Wegsamkeiten und/oder zur Entfestigung des umliegenden Gebirges kommen kann.

Am Streckenverschlussbauwerk anstehende Lösungen können entweder aus dem Grubengebäude oder vom Schacht her zuströmen. Die Zusammensetzung von Lösungen, die aus dem Grubengebäude an das Streckenverschlussbauwerk sowie das umliegende Gebirge herantreten, wird maßgeblich durch die Mineralogie entlang des Zutrittspfades bestimmt. Hier kommt es zu einer Lösung einzelner Mineralphasen und einer Aufsättigung der Lösung mit den entsprechenden Anionen und Kationen. Daher ist eine Aussage über die Zusammensetzung von Lösungen, die sich entlang des Zutrittspfades aufsättigen, immer nur standortbezogen möglich. Aufgrund der Aufsättigung der Lösungen entlang des Zutrittspfades ist ein Kontakt von ungesättigten Lösungen mit dem Streckenverschlussbauwerk nicht anzunehmen[55]. Für die Zusammensetzung der zutretenden Lösungen lassen sich im Wesentlichen zwei unterschiedliche Szenarien unterscheiden, die sich hinsichtlich der entlang des Zutrittspfades vorkommenden Salzminerale unterscheiden.

Das erste Szenario stellt einen Zutrittspfad dar, entlang dessen nur Steinsalz und keine weiteren Evaporitminerale (wie z.B. Kalisalze) aufgeschlossen sind. In diesem Fall ist nur ein Zutritt von NaCl-gesättigten, und  $MgCl_2$ -untersättigten Lösungen an das Streckenverschlussbauwerk zu berücksichtigen. In dieser Lösung ist nur Halit (Steinsalz) lösungsstabil.

Tab. 3: Gehalte der gelösten Stoffe in IP21 Lösung und gesättigter NaCl-Lösung[56]

	Konzentration g/l				H <sub>2</sub> O	Stabile Bodenkörper
	MgSO <sub>4</sub>	MgCl <sub>2</sub>	KCl	NaCl		
IP21-Lösung	34	313	40	21	885	Carnallit – Kainit – Sylvin – Halit
Gesättigte NaCl-Lösung	0	0	0	359	841	Halit

Das zweite und wesentlich komplexere Szenario ist ein Grubengebäude in dem neben Steinsalz mehrere, unterschiedliche Kalisalze aufgeschlossen sind. Diese beeinflussen sich gegenseitig in ihrem Lösungsverhalten, wobei die Lösungen neben Natrium- und Chloridionen auch Kalium-, Magnesium- und Sulfationen enthalten. Für den zweiten Fall muss eine standortbezogene Betrachtung durchgeführt werden, um eine Aussage über die Zusammensetzung von Lösungen treffen zu können. Beispielsweise ist in Tab. 3 die im Kontakt mit den im Endlager Morsleben vorkommenden Kalisalzen zu erwartende Lösungszusammensetzung (IP21-Lösung) angegeben. In dieser Lösung sind Carnallit ( $KMgCl_3 \cdot 6H_2O$ ), Kainit ( $KMg[Cl]SO_4 \cdot 3H_2O$ ), Sylvin (KCl) und Halit (NaCl) lösungsstabil. Wichtig ist, dass zutretende Lösungen im Lösungsgleichgewicht mit den am Barrierestandort vorherrschenden Salzmineralen sind, da andernfalls die Dichtheit der Barriere beeinträchtigt werden kann.

Um sicherzugehen, dass die zutretenden Lösungen in Bezug auf die am Barrierestandort vorkommenden Minerale gesättigt sind, können Vorschüttungen bestehend aus Salzgrus mit einer definierten mineralogischen Zusammensetzung zum Einsatz kommen [108]. Die Vorschüttungen werden entlang der Zugangsstrecken zum Streckenverschlussbauwerk eingebracht. Bei einem Lösungszutritt werden die Vorschüttungen teilweise gelöst, wodurch sich die chemische Zusammensetzung der zutretenden Lösung verändert und diese nicht mehr untersättigt ist in Bezug auf die am Barrierestandort vorkommenden Minerale.

Zusätzlich zu den oben genannten Lösungen können auch Lösungen, die im Zusammenhang mit der Einbringung des Baustoffes des Streckenverschlussbauwerks stehen, zum Lösen und somit zur Schädigung des konturnahen Gebirges führen. Die zwei Möglichkeiten die hier bestehen sind zum einen, dass der Baustoff beim Abbinden Überstandslösung abgibt, die in Bezug auf die umliegenden

Salzminerale untersättigt ist. Zum anderen kann die Baustoffsuspension, solange diese noch nicht abgebunden ist, das umliegende Salzgebirge lösen. Daher müssen die zur Errichtung des Streckenverschlussbauwerks eingesetzten Baustoffe sorgfältig auf die am Barrierenstandort vorkommenden Salzminerale abgestimmt werden. Im Kapitel 3.3.2 werden mögliche Baustoffe vorgestellt, und es werden mögliche Wechselwirkungen zwischen den Salzmineralen am Barrierenstandort und den Baustoffen des Streckenverschlussbauwerks beschrieben.

### **Auflockerungszone**

Die Auflockerungszone ist ein Bereich um die Strecke, in dem es durch die Bildung von feinsten Rissen oder der Aufweitung des Salzgefüges entlang von Korngrenzen zu einer Erhöhung der Permeabilität kommen kann[20, 21]. Durch Spannungsumlagerungen im Gebirge, die während der Streckenauffahrung aber auch während der Standzeit der Strecke auftreten, kommt es im Laufe der Zeit zur Ausbildung der Auflockerungszone. Entscheidend für die Stärke der Schädigung des Gebirges in der Auflockerungszone, als auch deren Erstreckung in das Salzgebirge hinein, sind die Auffahrungsmethode und die Standzeit der Strecke. Die Auflockerungszone reicht meist wenige Dezimeter, bis hin zu ein oder zwei Metern in das Gebirge hinein [104, 105, 106].

Die Ausbildung der Auflockerungszone wird stark durch die Auffahrungsmethode beeinflusst. Aus diesem Grund werden Strecken, in denen Verschlussbauwerke erstellt werden sollen, so gebirgsschonend wie möglich aufgefahren. Hierbei wird die konventionelle Streckenauffahrung mittels Bohren und Sprengen als die ungeeignetste Methode betrachtet. Durch die Sprengung kommt es zu einer starken Beanspruchung des Gebirges auch über die Streckenkontur hinaus, was zur Bildung einer ausgedehnten Auflockerungszone führt. In Untersuchungen zur Durchlässigkeit des konturnahen Bereiches von bergmännisch aufgefahrenen Gasspeichern wurde festgestellt, dass sich bei Sprengarbeiten die Durchlässigkeit um das  $10^5$ - bis  $10^6$ -fache erhöht[22].

Um eine möglichst geringfügig ausgebildete Auflockerungszone zu erhalten wird daher die Strecke, in der das Streckenverschlussbauwerk errichtet werden soll, mit einer Teilschnittmaschine aufgefahren. Kurz vor dem Beginn der Errichtung des Streckenverschlussbauwerks wird die Auflockerungszone erneut mit einer Teilschnittmaschine um 20 bis 50 cm nachgeschnitten[8]. Durch das Entfernen der Auflockerungszone werden im konturnahen Bereich ähnliche Permeabilitäten wie im intakten Salzgebirge gemessen (Vgl. Abb. 4).

### **Deliqueszenzfeuchtigkeit**

Eine weitere Eigenschaft der Salzminerale, die Beachtung finden muss, ist die Deliqueszenzfeuchtigkeit. Die Deliqueszenzfeuchtigkeit gibt die für jedes Salz spezifische Luftfeuchtigkeit an, ab der Feuchtigkeit durch das Salz aus der Luft aufgenommen wird. Im Kontakt mit der in den Grubenwettern enthaltenen Feuchtigkeit kann es zur Destabilisierung und Auflösung einiger Salze kommen. Soweit Werte zur Deliqueszenzfeuchtigkeit in der Literatur gefunden werden konnten, sind diese in Tab. 2 angegeben.

Im Falle des Auftretens von Mineralien mit einer besonders geringen Deliqueszenzfeuchtigkeit muss bei der Errichtung des Streckenverschlussbauwerks auf einen möglichst kurzen Zeitraum zwischen Nachschnitt und Betonage des Streckenverschlussbauwerks geachtet werden. Andernfalls kann es zum teilweisen Herauslösen einzelner Minerale in der Streckenkontur durch die Feuchtigkeit der

Grubenwetter kommen, was zur Ausbildung von Wegsamkeiten im Salzgebirge um das Streckenverschlussbauwerk führen kann.

Um den Einfluss der Deliqueszenzfeuchtigkeit auf die Permeabilität des konturnahen Gebirges zu minimieren, sollten bei der Planung des Streckenverschlussbauwerks Standorte im Steinsalz bevorzugt werden. Falls keine Barrierenstandorte im Steinsalz zur Verfügung stehen, besteht die Möglichkeit, durch Beschichtungen der Streckenkontur die Aufnahme von Feuchtigkeit aus den Grubenwettern zu verhindern [41].

Wichtig für die Funktionalität der Strömungsbarriere ist die Auswahl eines geeigneten Barrierenstandortes sowie dessen gezielte Vorbereitung für die Errichtung der Strömungsbarriere. Durch die Beachtung der Besonderheiten im Lösungsverhalten der Salzminerale sowie dem Entfernen der Auflockerungszone ist es möglich im Bereich des konturnahen Gebirges sehr niedrige Permeabilitäten zu realisieren.

### 3.3.2 Baustoff des Streckenverschlussbauwerks

Die für die Errichtung des Streckenverschlussbauwerks eingesetzten Baustoffe müssen unter den im Endlager herrschenden Bedingungen beständig sein, um die Funktionalität des Bauwerkes gewährleisten zu können [99, 24]. Insbesondere wird die Beständigkeit des Baustoffes durch chemische Korrosionsprozesse beeinträchtigt. Somit wird die Beständigkeit des Baustoffes im Wesentlichen durch die am Barrierenstandort vorherrschenden geochemischen Bedingungen beeinflusst. Sowohl infolge von Reaktionen zwischen dem Baustoff des Streckenverschlussbauwerks mit den anstehenden Salzmineralen als auch mit zutretenden Lösungen können die Eigenschaften des Baustoffes hinsichtlich der Barrierewirkung nachteilig beeinflusst werden. Die ablaufenden Korrosionsprozesse sind abhängig von den eingesetzten Baustoffen, der Zusammensetzung der zutretenden Lösungen und der Mineralogie am Barrierenstandort [15]. Im Folgenden werden zuerst Baustoffe vorgestellt, die prinzipiell für den Einsatz im Salinar geeignet sind. Für einzelne als besonders geeignet erachtete sowie bereits erprobte Baustoffe wird nachfolgend auf die Rahmenbedingungen, unter denen diese im Salinar eingesetzt werden können, eingegangen.

#### Mögliche Baustoffe

Es gibt eine Reihe von Baustoffen, die für die Errichtung von Streckenverschlüssen im Salinar prinzipiell zur Verfügung stehen. Sie können in arteigene Materialien (die natürlicherweise in Salzlagerstätten vorkommen) sowie nicht arteigene Materialien unterteilt werden (Tab. 4)[14].

Tab. 4: Zusammenstellung von Baustoffen, die für die Errichtung von Streckenverschlussbauwerken im Salinar prinzipiell zur Verfügung stehen (Nach[14]).

Arteigene Materialien	Nicht Arteigene Materialien
Salzgrus (ggf. mit Zusatzstoffen wie Bentonit)	Basalt
Salzbriketts/-blöcke	Bitumen/Asphalt
SVV (selbstverheilender Versatz; bei Zutritt von Lauge erhärtender Salzversatz)	Bentonit/Salzton
AISKRISTALL (bei Einbau erhärtende Evaporitminerale)	Beton mit Hartgesteinszuschlag (Solebeton mit Bindemittel Zement oder MgO und Salzlösungen als Anmischflüssigkeit)
	Beton mit Salzzuschlag (Salzbeton mit Bindemittel Zement oder MgO)
	Baustoffe mit Anhydrit als Bindemittel

Neben der theoretischen Eignung als Baustoff für die Errichtung von Streckenverschlussbauwerken stellt der Nachweis der Eignung im Rahmen von großtechnischen in-situ Versuchen einen wichtigen Beleg der Einsatzreife des Baustoffes dar. Aus solchen großtechnischen Versuchen gehen Bentonit, Salzbetone, Sorelbetone und künstlich verdichteter, kompaktierter Salzgrus als erprobte Baustoffe für die Erstellung von Dichtelementen hervor. Allerdings sind Bentonitdichtelemente nicht mechanisch belastbar und Salzgrus erreicht erst langfristig nach hinreichender Kompaktion seine Eignung als Dichtelement[14]. Das heißt, für die Errichtung von eigentragfähigen Streckenverschlussbauwerken, die bereits kurz nach der Fertigstellung fluiddicht sind, eignen sich lediglich Salzbetone oder Sorelbeton. Daher werden in dieser Arbeit nur hydraulisch abbindende Baustoffe, wie Salzbeton und Sorelbeton, für die Erstellung von Streckenverschlussbauwerken betrachtet.

Salzbeton besteht aus Zement, Anmischflüssigkeit sowie einem Zuschlagsstoff. Im Gegensatz zum üblicherweise im Bauwesen eingesetzten Beton wird als Anmischflüssigkeit NaCl-gesättigte Lauge verwendet und als Zuschlagsstoff können Steinsalz, Sand oder eine Mischung aus beiden Materialien eingesetzt werden. Auch der Sorelbeton besteht aus dem Bindemittel, Anmischflüssigkeit und einem Zuschlagstoff. Im Gegensatz zum Beton werden beim Sorelbeton Magnesiumoxid anstelle von Zement als Bindemittel und Magnesiumchlorid Lauge als Anmischflüssigkeit eingesetzt. Als Zuschlagsstoffe können Steinsalz, Kalisalze oder silikatische Zuschläge verwendet werden.

Sowohl für Salzbetone als auch für Magnesiabinder gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Rezepturen, die hinsichtlich ihrer Eignung für die Errichtung von Streckenverschlussbauwerken von Endlagerbergwerken im Salinar erforscht und im untertägigen Einsatz getestet wurden. Besonders ausgiebig wurde hierbei der Salzbeton M2 im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens für die Stilllegung des Endlagers Morsleben untersucht. Im Salzbeton M2 kam eine spezielle Steinkohlenflugasche zum Einsatz, die heute nicht mehr verfügbar ist. Deswegen ist der Salzbeton M2 durch den sogenannten bgZ-Salzbeton ersetzt worden. Die Zusammensetzungen der beiden Salzbetone sind in Tab. 5 dargestellt.

Tab. 5: Rezeptur für jeweils 1 m<sup>3</sup> des bgZ-Salzbetons sowie des Salzbetons M2

Salzbeton M2												
Gesteinskörnung				Zement		Wasser				Zusatzstoff		
Steinsalz				CEM III/B 32,5 NW/HS/NA		-				Steinkohlenflugasche Filterasche (HKV)		
1072 kg/m³				328 kg/m		267 kg/m³				328 kg/m³		
bGZ-Salzbeton												
Gesteinskörnung				Zement		"Wasser"				Zusatzstoff		
Steinsalzzuschlag		Natursand 0/2		CEM III/B 32,5 N-LH/HS/NA		Frischwasser		NaCl-Lösung		Gesamt	Kalksteinmehl	
Zielitz		Rogätz		Holcim				Restwasser		Wasser	Schwenk, Bernburg	
Dichte	Masse, tr.	Dichte	Masse, tr	Dichte	Masse, tr.	Dichte	Masse	Dichte	Masse	Masse	Dichte	Masse, tr.
[kg/dm³]	[kg]	[kg/dm3]	[kg]	[kg/dm3]	[kg]	[kg/dm3]	[kg]	[kg/dm3]	[kg]	[kg]	[kg/dm3]	[kg]
2.16	770	2.64	307	3.05	328	1.00	165	1.20	150	315	2.74	328

Tab. 6: Rezeptur des Magnesiabinders MB10[60]

Silikatischer Zuschlag	Bindemittel	Anmachlösung
Körnung 0-8 mm	Kaustisches MgO Styromag G75	R-Lösung
63, 4 Gew. %	18,3 Gew. %	18, 3 Gew. %

Für den bgZ-Salzbeton liegen keine so weitreichenden Untersuchungsergebnisse wie für den Salzbeton M2 vor, weswegen dessen Eigenschaften hier vorgestellt werden. Für die Laboruntersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wird jedoch der bgZ-Salzbeton verwendet, da einzelne Bestandteile des

Salzbetons M2 nicht mehr verfügbar sind. Von den verfügbaren Magnesiabindern wird der Magnesiabinder MB10 (Tab. 6) betrachtet, der im Vorhaben CARLA eingesetzt wurde und sich auch im Labormaßstab gut handhaben lässt. In Tab. 7 sind einige der wichtigsten Materialkennwerte des Salzbetons M2 sowie des Magnesiabinders MB10 dargestellt.

Tab. 7: Unterschiedliche Materialeigenschaften des Salzbetons M2 sowie des Magnesiabinders MB10.

<b>Materialeigenschaft</b>	<b>Salzbeton M2<sup>[28]</sup></b>	<b>Materialeigenschaft</b>	<b>Magnesiabinder MB10<sup>[60]</sup></b>
<i>Rohdichte</i>	1,995	<i>Rohdichte</i>	2,24 t/m <sup>3</sup>
<i>Ausbreitmaß bei Raumklima. 0 und 60 Minuten nach dem Anmischen</i>	70 cm und 65 cm	<i>Ausbreitmaß</i>	55 cm bis 68 cm
<i>Erstarrungsbeginn</i>	-	<i>Erstarrungsbeginn</i>	ca. 4 h
<i>Erstarrungsende</i>	-	<i>Erstarrungsende</i>	ca. 6 h
<i>Einaxiale Druckfestigkeit</i>	23,4 MPa (Nach 28 Tagen Lagerung bei 20° C)	<i>Einaxiale Würfeldruckfestigkeit</i>	> 70 MPa
<i>Statischer E-Modul Abbindezeit 28 und 270 Tage</i>	11700 MPa (28 Tage) 19700 MPa (270 Tage)	<i>Statischer E-Modul</i>	> 30 GPa
<i>Zugfestigkeit</i>	2,04 MPa (56 Tage)	<i>Spaltzugfestigkeit</i>	> 4,5 MPa
<i>Thermischer Ausdehnungskoeffizient</i>	$4,8 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$	<i>Thermischer Ausdehnungskoeffizient</i>	$10^{-5} \text{ K}^{-1}$
<i>Permeabilität (Gaspermeabilität, Labor)</i>	$3,7 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$	<i>Permeabilität (Gaspermeabilität, Labor)</i>	$< 3 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$
<i>Wasserabsetzen (Zylinderdurchmesser 200 mm; Füllvolumen 62,8 Liter)</i>	6 Stunden: 3 mm 15 Stunden: 8 mm 48 Stunden: 6 mm		
<i>Endschwindmaß bei 20° C und 65 % rel. Luftfeuchtigkeit</i>	1,1 mm/M		
<i>Porosität</i>	18,2 %		

Sowohl der bgZ-Salzbeton als auch der Magnesiabinder MB10 weisen bei Messungen unter Laborbedingungen sehr geringe Permeabilitäten auf. Damit die Baustoffe auch im Streckenverschlussbauwerk diese geringen Permeabilitäten über den erforderlichen Zeitraum aufweisen, müssen einige Einflussfaktoren bei der Auswahl und Einbringung des Baustoffes beachtet werden. Die Baustoffe müssen mit zutretenden Lösungen sowie den Salzen der Streckenkontur kompatibel sein und zudem sind gewisse Rahmenbedingungen bei der Einbringung zu berücksichtigen. Nachfolgend werden diese Aspekte nähergehend erläutert.

### Kompatibilität mit zutretenden Lösungen

Nach der Errichtung des Streckenverschlussbauwerks ist es möglich, dass entweder aus dem Grubengebäude oder vom Schacht Lösungen an den Baustoff herantreten. Diese Lösungen sättigen sich entlang des Fließweges in Bezug auf die anstehenden Salze auf. Prinzipiell sind in Bezug auf Korrosionsprozesse in den hydraulisch abbindenden Baustoffen zwei Lösungen zu unterscheiden. Diese können entweder rein NaCl gesättigt und MgCl<sub>2</sub> untersättigt sein oder neben NaCl auch einen

signifikanten Anteil an  $\text{MgCl}_2$  enthalten. Für die Auswahl des geeigneten Baustoffes ist insbesondere der  $\text{MgCl}_2$ -Gehalt der Lösung von Bedeutung, wobei unterschieden wird zwischen:

- NaCl gesättigten Lösungen mit einem Gehalt von unter 50 g/L  $\text{MgCl}_2$
- NaCl gesättigten Lösungen mit einem Gehalt von über 50 g/L  $\text{MgCl}_2$

Beim Kontakt von Salzbetonen mit sulfat- und magnesiumhaltigen Lösungen kann es zum Sulfattreiben oder dem lösenden Angriff durch Magnesium kommen.

Beim Sulfattreiben können die in der zutretenden Lösung enthaltenen Sulfate mit dem Zementstein im Salzbeton unter der Bildung von Ettringit reagieren. Bei der Ettringitbildung wird dem Zementstein Calcium entzogen, wodurch es zu einer Entfestigung des Betons kommen kann[59].

Der lösende Angriff durch Magnesium führt dazu, dass das Calcium der Calcium-Silikat-Hydrat Phasen des Zementsteins unter der Bildung von Magnesium-Silikat-Hydraten herausgelöst wird, wobei die Festigkeit des Baustoffes bis zur völligen Entfestigung sinkt[59].

Daher sollte Salzbeton als Baustoff eingesetzt werden, wenn zu erwarten ist, dass die zutretenden Lösungen zwar NaCl gesättigt sind, jedoch einen möglichst geringen Magnesiumchloridgehalt aufweisen. Sorelbeton hingegen ist erst stabil, wenn die zutretende Lösungen einem  $\text{MgCl}_2$ -Gehalt von über 50 g/l  $\text{H}_2\text{O}$  aufweisen[34]. Im Kontakt mit geringer mineralisierten Lösungen kommt es zur Auswaschung von Chlorid aus dem Sorelbeton, wodurch dieser destabilisiert wird [109].

### **Kompatibilität mit dem Gebirge**

Bei der Auswahl des Baustoffes muss die Kompatibilität zwischen Baustoff und dem anstehenden Gebirge beachtet werden. Durch die Einbringung des Baustoffes darf das anstehende Gebirge nicht in seiner Abdichtwirkung beeinträchtigt werden. Zum einen muss bei der Auswahl des Baustoffs darauf geachtet werden, dass der Baustoff solange dieser noch nicht abgebunden ist, die anstehenden Salze nicht lösen kann. Zum anderen dürfen eventuell aus dem Baustoff freigesetzte Überstandslösungen nicht gegenüber dem anstehenden Gebirge lösungsfähig sein. Da Sorelbeton mit Magnesiumchloridlösung als Anmischflüssigkeit hergestellt wird, ist dieser lösungsstabil gegenüber Steinsalz sowie den meisten Kalisalzen und wird daher im Kontakt mit Steinsalz und leichtlöslichen Kalisalzen eingesetzt. Einzig einzelne leichtlösliche Minerale, wie z.B. Bischofit können instabil im Kontakt mit Sorelbeton sein, wobei dies abhängig ist von der Zusammensetzung der zur Erstellung des Sorelbetons verwendeten Anmischflüssigkeit.

Zur Herstellung von Salzbeton wird NaCl-gesättigte Lösung ohne Magnesiumchlorid eingesetzt. Daher ist nur Steinsalz sowohl im Kontakt mit dem Baustoff als auch freigesetzten Überstandslösungen stabil.

### **Einbringung des Baustoffs**

Durch eine geeignete Einbringung des Baustoffes sowie die Vorbereitung des Barrierenstandortes ist sicherzustellen, dass sowohl ein homogener Baustoffkörper, der keine Angriffspunkte für Korrosionsprozesse bietet, als auch eine vollständige Anbindung des Baustoffes an das Gebirge realisiert wird.

Bei der Einbringung des Baustoffes ist die Entstehung von Betonierfugen zu vermeiden. Als Betonierfuge werden Schichtgrenzen im Baustoff bezeichnet, die durch Aushärtung des Baustoffes

während Unterbrechungen des Einbringungsverfahrens entstehen. Problematisch an diesen Schichtgrenzen ist, dass sie im Vergleich zum homogenen Beton (keine Schichtgrenzen) erhöhte Permeabilitäten aufweisen und es entlang der Betonierfuge zur Korrosion des Baustoffes kommen kann. Daher soll das Betonieren „nass in nass“ bzw. „frisch in frisch“ erfolgen, um die Bildung einer axialen Betonierfuge im Bauwerk zu vermeiden[26].

Um eine möglichst vollständige Anbindung des Baustoffes an das Gebirge zu erreichen, wird die Firste in Richtung der Stirnseite des Bauwerks, von der der Baustoff eingebacht wird, ansteigend nachgeschnitten. In den Planfeststellungsverfahrenunterlagen für das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben ist ein Anstieg der Firste von 2° vorgesehen[23]. Durch die möglichst vollständige Anbindung des Baustoffes des Streckenverschlussbauwerks an das anstehende Gebirge soll die Ausbildung von Schwachstellen bzw. Wegsamkeiten im Kontaktbereich zwischen Baustoff und Gebirge für zutretende Lösungen vermieden werden.

### **3.3.3 Kontaktbereich Baustoff/Gebirge**

Zur Berechnung der integralen Permeabilität wird neben dem anstehenden Gebirge mit der Auflockerungszone und dem Baustoff des Streckenverschlussbauwerks auch der Kontaktbereich zwischen Baustoff und Gebirge herangezogen. Um die Funktionstüchtigkeit des Streckenverschlussbauwerks zu gewährleisten, müssen alle drei betrachteten Strömungsräume dicht gegenüber Fluiden sein [108].

Durch das Nachschneiden der konturnahen Auflockerungszone mit den Bereichen erhöhter Permeabilität vor der Errichtung des Streckenverschlussbauwerks sowie einem qualitätsgesicherten Einbringen des Baustoffes wird angenommen, dass sehr niedrige Permeabilitätswerte in diesen beiden Bereichen erreicht werden können.

Abb. 4 stellt den vertikalen Schnitt durch ein in der Schachtanlage Asse 2 errichtetes Streckenverschlussbauwerk dar. An diesem Streckenverschlussbauwerk wurden nach der Errichtung zahlreiche Messungen durchgeführt, unter anderem Permeabilitätsmessungen. Die Permeabilitätsmessungen erfolgten sowohl integral, also gemittelt über größere Abschnitte, als auch innerhalb sehr kleiner Abschnitte, die belastbare Messwerte für die Permeabilität des Baustoffes des Streckverschlussbauwerks, der Kontaktzone zum Gebirge als auch dem konturnahen Salzgebirge liefern. Diese gewonnen Messwerte zeigen, dass im Baustoff des Streckenverschlussbauwerks die geringsten Permeabilitäten gemessen wurden ( $3,0 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  bis  $1,9 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ ), gefolgt von dem konturnahem Salzgebirge ( $2,9 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  bis  $1,1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ ).



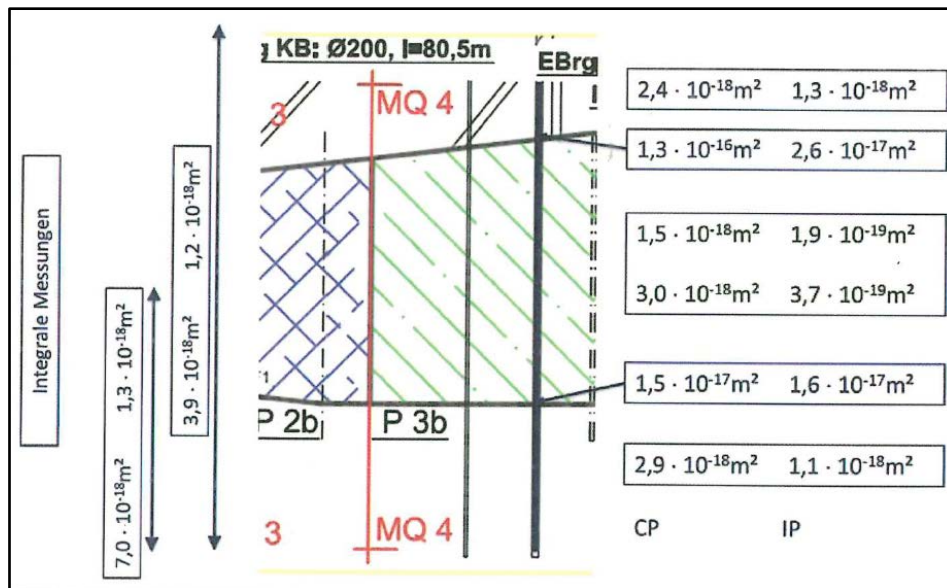


Abb. 4: Permeabilitätsmessungen eines Streckenschlussbauwerks. Die Permeabilitätsmesswerte im rechten Bereich der Abbildung wurden im Steinsalz, dem Kontaktbereich Bauwerk/Gebirge sowie im Baustoff ermittelt und zeigen dass die Kontaktfuge den Bereich mit der höchsten Permeabilität aufweist [101].

Der durchlässigste Bereich des Streckenschlussbauwerks war der Kontaktbereich zwischen dem Baustoff des Streckenschlussbauwerks und dem Salzgebirge ( $1,3 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  bis  $1,5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ ). Diese Messwerte zeigen, dass auch bei niedrigen integralen Permeabilitäten, die im Streckenschlussbauwerk erreicht werden ( $3,9 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$  bis  $1,2 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ ), einzelne, durchlässigere Bereiche im Kontaktbereich Baustoff/Gebirge verbleiben.

### 3.4 Bildung Kontaktfuge / Schädigung des Kontaktbereichs

Auf die Querschnittsfläche des Bauwerkes betrachtet stellt die Kontaktfuge nur eine kleine Fläche dar. Jedoch können sich hier durch Schwindprozesse während des Abbindeprozesses der verwendeten hydraulisch abbindenden Baustoffe besonders im Firstbereich Wegsamkeiten bilden, wodurch die Permeabilität in diesem Bereich erhöht und Korrosionsprozesse begünstigt werden.

Im Bauwesen gibt es zwar spezielle Baustoffe, die ohne Schwindprozesse erhärten, jedoch stehen aufgrund der spezifischen Anwendungsaufgaben aus dem Endlagerbergbau sowie der Notwendigkeit der Eignung der Baustoffe für den Einsatz im Salinar nur wenige Baustoffe zur Errichtung von Streckenschlussbauwerken in Endlagerbergwerken im Salz zur Verfügung. Die verfügbaren Baustoffe wurden im Kapitel 3.2.2 vorgestellt. Von diesen Baustoffen eignen sich nur die beiden hydraulisch abbindenden Materialien, da damit eigentragfähige Streckenschlussbauwerke, die bereits kurz nach der Fertigstellung fluiddicht sind, erstellt werden können. Jedoch neigen diese beiden hydraulisch abbindenden Baustoffe zum Schwinden während des Abbindeprozesses. Das Schwinden setzt sich aus mehreren, sich teilweise überlagernden Schwindprozessen zusammen von denen einer das autogene Schwinden ist.

Als autogenes Schwinden wird der Volumenverlust des Baustoffs beim Abbindevorgang bezeichnet. Das autogene Schwinden tritt bei allen hydraulisch abbindenden Baustoffen auf, wobei es bei Salzbeton stärker ausgeprägt ist als bei normalem Beton. Untersuchungen im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens zur Stilllegung des Endlagers Morsleben ergaben, dass das autogene

Schwinden bis zu 1 mm pro Meter Salzbeton betragen kann, wobei der Mittelwert der Versuche nach einer Abbindezeit von 2000 Stunden (83 Tage) bei 0,5 mm/Meter lag[23]. Für den sehr detailliert untersuchten Salzbeton M2 liegen die in Abb. 5 gegebenen Informationen zum Schwinden des Betons über die Abbindezeit vor.

Neben dem autogenen Schwinden kommt es auch zu thermischen Schwindvorgängen im Baustoff. Beim Abbindevorgang wird Energie in Form von Wärme frei, was zu einer Aufheizung und Ausdehnung des Bauwerks führt. Allerdings kehrt sich dieser Prozess nach dem Abbindevorgang um und mit dem Abkühlen des Bauwerks kommt es zu einer Volumenabnahme. Zudem kann es durch thermische Spannungen infolge unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen dem Baustoff des Streckenverschlussbauwerks und dem Steinsalz zur Schädigung des Kontaktbereiches kommen, ohne dass es zu einer Überschreitung der Haftzugfestigkeit kommt.

Bei beiden Schwindvorgängen spielt die Anbindung des Baustoffes an das Gebirge eine wichtige Rolle. Wenn sich während der Abbindephase eine gute und stabile Verbindung zwischen Baustoff und Gebirge ausbilden kann, z.B. durch Anlösen des Salzes durch die Feuchtigkeit im Baustoff und anschließende Bildung von kristallinen Verwachsungen zwischen Baustoff und Gebirge, kann die Gefahr von Umläufigkeiten durch Schwindvorgänge reduziert werden.

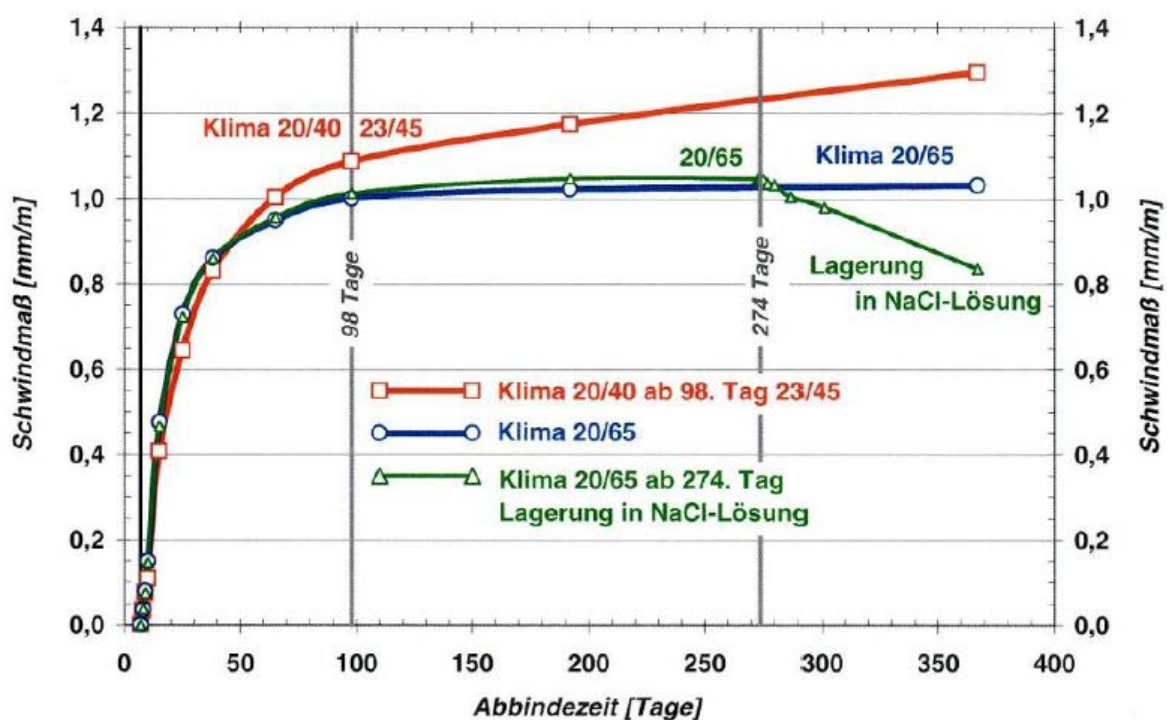


Abb. 5: Schwindmaße des Salzbetons M2 in Abhängigkeit der Abbindezeit der Prüfkörper. Die Proben Klima 20/40 wurden bei 20°C und 40 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert und die Proben Klima 20/65 bei 20° C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit[28].

In Abb. 5 ist das Schwindmaß des Salzbetons der Rezeptur M2 über die Abbindezeit dargestellt. Hierbei lässt sich erkennen, dass das Schwinden im Wesentlichen in den ersten 50 bis 100 Tagen nach der Herstellung des Betons stattfindet. Dies ist von Bedeutung, da hydraulisch abbindende Baustoffe infolge des Abbindeprozesses ihre maximale Festigkeit nicht sofort aufweisen, sondern erst nach einigen Wochen erreichen. Entscheidend für die Entstehung von Trennflächen im Baustoff oder im Kontaktbereich Baustoff/Gebirge ist der Aufbau von Zugspannungen durch die oben genannten

Schwindprozesse. Um auszuschließen, dass durch die Zugspannungen Trennflächen im Bauwerkskörper entstehen, wurden im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens zur Stilllegung des Endlagers Morsleben sowohl Zugfestigkeitsuntersuchungen am Salzbeton M2, als auch Haftzugfestigkeitsuntersuchungen im Kontaktbereich Salzbeton/Steinsalzgebirge zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach dem Abbinden durchgeführt. Diese in Tab. 8 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die Zugfestigkeit des Salzbetons zu allen Zeitpunkten deutlich größer ist als die des Kontaktbereichs zwischen Salzbeton und Steinsalzgebirge. Demzufolge kommt es, eine qualitätsgesicherte Einbringung des Salzbetons vorausgesetzt, zur Überschreitung der Zugfestigkeit im Kontaktbereich und nicht im Baustoff.

Tab. 8: Ermittelte Zugfestigkeit von Salzbeton M2 sowie die Haftzugfestigkeit zwischen Steinsalz und dem Salzbeton M2 in Abhängigkeit des Abbindealters[26].

Wirksames Betonalter $t_e$ [d]	14	28	56
<b>Zugfestigkeit <math>f_{ct}</math> Salzbeton M2 [MPa]</b>			
<b>Mittelwert <math>m_R</math></b>	1.0888	2.4279	3.2500
<b>Standardabweichung <math>\sigma</math></b>	0.2174	0.4937	0.4333
<b>5%-Fraktil <math>f_{ct, 5\%}</math></b>	0.7312	1.6156	2.5373
<b>95%-Fraktil <math>f_{ct, 95\%}</math></b>	1.4463	3.2401	3.9627
<b>Haftzugfestigkeit <math>f_{t, \text{Kontaktzone Salzbeton M2 – Salz}}</math> [MPa]</b>			
<b>Mittelwert <math>m_e</math></b>	0.2447	0.5821	0.7007
<b>Standardabweichung <math>\sigma_e</math></b>	0.0350	0.1301	0.1754
<b>5%-Fraktil <math>f_{tf, 5\%}</math></b>	0.1871	0.3681	0.4122
<b>95%-Fraktil <math>f_{tf, 95\%}</math></b>	0.3023	0.7962	0.9891

\* wirksames Betonalter = 51 d

Zur Kontaktfugenbildung und zum Abreißen des Kontakts zwischen Baustoff und Gebirge wurden im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens für die Stilllegung des Endlagers in Morsleben Berechnungen durchgeführt. Diese zeigen, dass mit der Rissbildung im Kontaktbereich Gebirge/Bauwerk gerechnet werden muss und es im Extremfall zur Ausbildung eines Ringspalts zwischen Baustoff und Gebirge kommen kann. Als Kriterium für einen Abriss zwischen Gebirge und Baustoff wurde hierbei die Überschreitung einer Zugspannung von 0,2 MPa angenommen[23].

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass die Kontaktfugenbildung wahrscheinlich während der ersten 100 Tage nach der Errichtung des Streckenverschlussbauwerks eintritt. Sie tritt als Folge einer Überschreitung der Haftfestigkeit im Kontaktbereich Bauwerk/Gebirge durch die Schwindprozesse des Baustoffes auf. Bedingt durch die Schwerkraft ist die Bildung der Kontaktfuge im Firstbereich als wahrscheinlich zu erachten, da es zu einer guten Anbindung zwischen Baustoff und Gebirge entlang der Sohle des Bauwerks durch die Auflast des eingebrachten Baustoffes kommt. Falls es zur Überschreitung der Haftspannung zwischen Bauwerk und Gebirge kommt, ist anzunehmen, dass sich ein Riss ausbildet. Der entstandene Riss wird eine Öffnungsweite besitzen, die vermutlich im Bereich der Volumenabnahme des Baustoffes infolge der Schwindprozesse liegt.

Im Kontaktbereich zwischen Salzgebirge und dem Baustoff des Streckenverschlussbauwerks ist von der Bildung von Bereichen, die im Vergleich zum Baustoff des Streckenverschlussbauwerks sowie dem Salzgebirge erhöhten Permeabilitäten aufweisen, auszugehen. Jedoch ist es möglich, durch das Injizieren von Baustoffen in diese permeableren Bereiche Wegsamkeiten zu verschließen und somit diesen Bereich abdichten. Im folgenden Abschnitt wird nähergehend auf die Rahmenbedingungen bei Injektionsmaßnahmen im Salinar sowie die einsetzbaren Injektionsmaterialien eingegangen.

## 4. Injektionen

Injektionsmaßnahmen sind ein Routineverfahren, das im Bergbau- und Tunnelbau zur Abdichtung von Wegsamkeiten im Gebirge eingesetzt wird. Hierbei werden je nach Aufgabenstellung unterschiedliche Injektionsmaterialien in Risse/Klüfte sowie Porenräume injiziert. Im Tunnelbau und Bergbau werden Injektionen oftmals eingesetzt, um Gebräches Gebirge zu verfestigen sowie zur Abdichtung von Lösungszutritten. Als Injektionsmaterialien werden erhärtende Flüssigkeiten oder Suspensionen eingesetzt. Durch das gezielte injizieren des Kontaktbereichs zwischen Streckenverschlussbauwerk und Salzgebirge können Wegsamkeiten im Bereich der Kontaktfuge mit Baustoff verschlossen werden, wodurch eine Permeabilitätsreduktion erreicht wird. Bei der Injektion der Kontaktfuge handelt es sich jedoch entgegen den oben beschriebenen Injektionen im Berg- und Tunnelbau nicht um ein Routineverfahren. Das liegt zum einen an der für Injektionen eher ungewöhnlichen Gebirgsformation Salz und zum anderen an den Restriktionen, die sich für die Erstellung eines Bauwerks in einem HAW-Endlager ergeben.

Nur in seltenen Fällen ist der Einsatz von Injektionsmaßnahmen im Salzbergbau nötig. Anders als in anderen Gesteinsformationen (Lockersedimenten, Sedimentgesteine oder geklüftetes Kristallingestein) ist im Salinar vergleichsweise selten mit Lösungszutritten beim Streckenvortrieb zu rechnen. Zudem treten im Salzgebirge nur selten Bereiche mit gering verfestigten bzw. gebrächen Gesteinsformationen auf. Dies führt insgesamt dazu, dass nur im geringen Maße im Salinar Injektionsmaßnahmen durchgeführt werden. Hinsichtlich der eingesetzten Injektionstechnik sowie Injektionsverfahren bestehen keine wesentlichen Unterschiede zwischen Injektionsmaßnahmen im Salinar und anderen Gesteinsformationen. Der große Unterschied bei Injektionen im Salinar sind die im Kontakt mit dieser Gesteinsformation einsetzbaren Injektionsmaterialien.

Für die Durchführung von Injektionsmaßnahmen im Salinar stehen im Vergleich zu anderen Gesteinsformationen vergleichsweise wenige Injektionsmaterialien zur Verfügung. Die Auswahl wird dadurch eingeschränkt, dass im Kontakt mit den geochemischen Rahmenbedingungen, die sich aus der Notwendigkeit der Kompatibilität zwischen Injektionsmedium, Salzgebirge, Baustoff des Streckenverschlussbauwerks und zutretenden Lösungen ergeben, nur wenige Injektionsmaterialien kompatibel sind.

Die Anzahl der möglichen verfügbaren Injektionsmittel wird zudem weiter eingeschränkt durch die Restriktionen, die sich infolge des Einsatzes in einem HAW-Endlager ergeben:

- Sehr hohe Anforderungen hinsichtlich der zu erreichenden Permeabilität durch die Injektionsmaßnahme
  - o Injektionsmittel müssen in Wegsamkeiten mit geringen Öffnungsweiten eindringen können
- Nachweis der Beständigkeit der Baustoffe über lange Zeiträume:
  - o Die eingesetzten Baustoffe müssen unter den im Endlager herrschenden Bedingungen langfristig beständig sein [99], [24].

Um den Stand von Wissenschaft und Technik darzulegen, wird im Folgenden vorgestellt, welche Erkenntnisse hinsichtlich Injektionsmaßnahmen im Salinar vorliegen. Bei der Zusammenstellung der verfügbaren Literatur wird zwischen Erfahrungsberichten bereits durchgeführter Injektionsmaßnahmen, In-Situ Versuchen und Versuchen im Labormaßstab unterschieden. Aufgrund

des besonderen Einsatzbereiches der Kontaktfugeninjektion werden zudem Anforderungen an Injektionsmaterialien für diese Aufgabestellung zusammengestellt, die eine Auswahl geeigneter Injektionsmaterialien ermöglichen sollen. Abschließend werden unterschiedliche zur Abdichtung der Kontaktfuge geeignete Injektionsmaterialien vorgestellt.

#### **4.1 Injektionen im Salz**

Es gibt eine große Anzahl an Literatur, die sich mit der Injektion von Böden oder mit der Injektion von geklüftetem Fels im Tiefbau, im Tunnelbau oder im Bergbau beschäftigt. Im Vergleich hierzu ist der Informationsstand hinsichtlich Injektionsmaßnahmen, die im Salinar durchgeführt wurden sowie der hierbei eingesetzten Injektionsmaterialien gering.

In Tab. 9 wurden schriftliche Erfahrungsberichte zu Injektionsmaßnahmen im Salz zusammengestellt. Die Zusammenstellung beinhaltet eine kurze Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten zu den einzelnen Erfahrungsberichten, die wesentlichen Erkenntnisse sowie eine Auflistung der eingesetzten Injektionsmaterialien. Die durchgeführten Arbeiten umfassen einen Zeitraum von annähernd 100 Jahren und wurden mit unterschiedlichen partikelgestützten sowie partikelfreien Injektionsmaterialien durchgeführt.

Im Wesentlichen dienten die in den Erfahrungsberichten durchgeführten Maßnahmen dazu, Streckenverschlussbauwerke gegenüber zutretenden Lösungen abzudichten. Als weitere Aufgabenstellungen sind die Konturverfestigung in Wetterlaugenbereichen, die Abdichtung lösungsführender Gesteinsformationen sowie die Abdichtung beim Streckenvortrieb angefahrener Altbohrungen zu nennen. Insgesamt wurden im Rahmen der zusammengestellten Erfahrungsberichte sieben Streckenverschlussbauwerke injiziert. Bei den sieben genannten Streckenverschlussbauwerken, die injiziert wurden, ist in vier Fällen keine Information über den Erfolg der Maßnahme dokumentiert, in zwei Fällen waren die Bauwerke undicht und lediglich in einem Fall war das injizierte Streckenverschlussbauwerk dicht gegenüber der anstehenden Lösung.

Als Injektionsmaterialien wurden MgO-Mörtel, Zementsuspensionen sowie verschiedene Kunstharze eingesetzt. Teilweise wurden im Rahmen einer Injektionsmaßnahme unterschiedliche Injektionsmittel eingesetzt, wobei hier zuerst die partikelgestützten und nachfolgend zum Verschließen von Wegsamkeiten mit geringeren Öffnungsweiten partikelfreie Injektionsmaterialien injiziert wurden, jedoch brachte auch diese Herangehensweise nicht den gewünschten Abdichterfolg.

Zusätzlich zu den Erfahrungsberichten von durchgeführten Injektionsarbeiten sind auch einige Forschungsvorhaben/ Versuche zur Untersuchung der Kontaktfuge sowie Injektionen der Auflockerungszone und Kontaktfuge im Salinar durchgeführt worden. Die durchgeführten Versuche dienten der Untersuchung verschiedener Aufgabenstellungen/ Themengebiete, wobei sowohl In-Situ Versuche als auch Laborversuche durchgeführt wurden. Um einen Überblick über die bisher durchgeführten Forschungsarbeiten zur Kontaktfuge sowie Injektionen im Salinar zu geben, wurden die verfügbaren Informationen in Tab. 10 zusammengestellt und hinsichtlich der verschiedenen Themengebiete untergliedert. Hierbei wurde zuerst zwischen In-Situ Versuchen sowie Laborversuchen unterschieden, wobei beide Bereiche weiter untergliedert sind. Die Untergliederung erfolgte hinsichtlich der im Rahmen der Versuche durchgeführten Arbeiten, wobei zudem notiert wurde, welche Baustoffe bzw. Injektionsmaterialien eingesetzt wurden.

Im Rahmen der durchgeführten In-Situ Versuche wurden mit unterschiedlichen Messverfahren Permeabilitätsmessungen sowie Untersuchungen hinsichtlich der Bildung sowie der Ausbildung der Kontaktfuge durchgeführt. Zudem erfolgten Injektionen der Auflockerungszone, des Kontaktbereichs zwischen Streckenverschlussbauwerk und Salzgebirge sowie zwischen Oberflächenpackern aus hydraulisch abbindenden Baustoffen und dem Salzgebirge. Die meisten Untersuchungen (fünf) dienten der Untersuchung der Kontaktfugenbildung und Ausbildung in Form von Haftzugfestigkeitsversuchen an verschiedenen Materialkombinationen sowie der optischen Auswertung des Kontaktbereichs zwischen Baustoff und Salzgebirge. Insgesamt sieben unterschiedlichen Veröffentlichungen beschreiben Injektionsmaßnahmen, wobei drei Veröffentlichungen Injektion der Auflockerungszone sowie des Kontaktbereichs Baustoff/Gebirge beschreiben. Bei der Injektion des Kontaktbereichs wurde zweimal ein Feinstzement eingesetzt und jeweils einmal Bitumen und ein Kunstharz. Das partikelfreie Injektionsmaterial Natronwasserglas wurde im Rahmen der in der verfügbaren Literatur veröffentlichten In-Situ Versuche noch nie zur Kontaktfugeninjektion eingesetzt.

Tab. 9: Zusammenstellung von Erfahrungsberichten zu Injektionsmaßnahmen, die im Kontakt mit Salz durchgeführt wurden.

Erfahrungsberichte (Keine Forschungsvorhaben) – Injektionen im Salinar				
Literatur	Bergwerk	Datum	Injektionsmittel	Zusammenfassung der durchgeführten Tätigkeiten
Müller-Hoeppel, Pöhler [33]	Bischofserode	1923	MgO-Beton	Einpressen von MgO-Beton in eine Luftfuge zwischen zwei Bauwerksabschnitten zum Abdichten des Bauwerks gegenüber einem Lösungsdruck von 4,3 MPa.
Klemme [38]	Wilhelmine-Carlsgrube	1978	Polythion	Infolge der Umbauarbeiten des Bergwerks zu einem Rohöl-speicher wurden in den Schächten Verschlüsse errichtet die mit Bitumen gegen das Gebirge abgedichtet wurden. Anschließend wurde über Injektionsleitungen der Kontaktbereich mit den Kunstharz injiziert, jedoch stellte sich später heraus, dass die Verschlüsse nicht dicht waren.
Fischle [40]	Asse	1978-1989	Verschiedene Kunstharze	Im genannten Zeitraum kamen an verschiedenen Stellen unterschiedliche Kunstharztypen zum Verspannen von Druckgebern, Verpressen von Rissen oder zur Laugenabdichtung zum Einsatz. Im Vergleich mit zementbasierten Injektionsmitteln haben die Kunstharze den Vorteil, dass Wegsamkeiten mit geringeren Öffnungsweiten erreicht werden können. Zudem sind sehr unterschiedliche Harztypen erhältlich, die von ihren Eigenschaften an die Anforderungen der jeweiligen Verpreßmaßnahme angepasst werden können. Als Problem beim Einsatz von Kunstharzen wird genannt, dass die Beständigkeit in Laugen nachgewiesen werden muss.
Eyermann, Sambeek [37]	Weeks Island	1979	Zementsuspensionen, Epoxidharz	Beim Streckenvortrieb mittels konventioneller Verfahren wurden Laugenzuflüsse festgestellt, die zuerst von untertage aus und später in Kombination von untertage (chemische Injektionsmittel + Zement) als auch übertägig (Zementsuspensionen). Um die Strecke bei einem erneuten auftretenden Laugenzufluss abschotten zu können wurde 1979 ein Streckenverschluss errichtet und im Folgenden mit Tracergasen auf Dichtheit überprüft. Doch selbst trotz intensiver Bemühungen den Streckenverschluss abzudichten gelang dies nicht.
Schwerter [36]	Kalibetrieb Werra (Grube Springen und Unterbreizbach)	Beginn 1979	Magnesiabinder Polyurethan, Polyester	Abdichtung von Lösungszuflüssen im Bereich von Kallilager mittels Magnesiabinderinjektionen (bis 300 µm) sowie mit Polyurethan (50µm). Die Abdichtungsmaßnahmen wurden über Bohrlöcher durchgeführt. Zudem wurden im Bereich eines Basaltschlotes Abdichtungsmaßnahmen mit Magnesiabinder und anschließender Feinabdichtung mit den beiden Kunstharzen durchgeführt.
Kolditz, Steinberg [35]	Asse	1982	2K-Epoxidharz	Durch feuchte Grubenwetter kam es im Bereich eines Schachtes zur Bildung von kavernen Auslaugungserscheinungen im Carnallit und Kieserit. Mit dem Harz wurde zuerst die Oberfläche versiegelt und anschließend wurde das umliegende Gebirge über bis zu 1,5 Meter lange Bohrlöcher injiziert.
Eyermann, Sambeek [37]	Esterhazy (K2) Mine	1987	Zementsuspension	In einem nicht zugänglichen Bereich des Grubengebäudes kam es zu Lösungszutritten, die durch die Errichtung von vier Streckenverschlüssen kontrolliert wurden. Es wurden zusätzlich zwei weitere Streckenverschlüsse errichtet um ein Verfahren zur Abdichtung der Auflockerungszone (Disturbed Rock Zone) aufzuzeigen. Bei diesen Verschlüssen wurde der Kontaktbereich Bauwerk/Gebirge über Injektionsleitungen mit einer Zementsuspension injiziert. Eine Druckbeaufschlagung fand nicht statt.
Eyermann, Sambeek [37]	Markel Mine	1988	Polyacrylat	In einer konventionell aufgefahnenen Strecke wurde 14 Jahre nach der Auffahrung ein Streckenverschlussbauwerk errichtet. Vor der Errichtung wurden die Streckenkonturen um 1,6 Meter zurückgeschnitten und nach der Errichtung des Bauwerks wurde der Kontaktbereich zum Salz mit Polyacrylat injiziert.
Gläß, et. al. [32]	Asse	1990er	Zement	Zur Nachinjektion des handverstopften Firstbereichs des aus Salzbeton hergestellten Asse-Vordamms wurde über vorher verlegte Injektionsleitungen ein zementbasiertes Injektionsmittel injiziert.
Krauke, Fließ [34]	Asse	2003	MgO (IM 3)	Nachinjektion der Kernzone einer Fluidbarriere
Neuhauser, Redetzke [39]	Nicht veröffentlichtes Salzbergwerk in Kansas	2010	Zement	Beim konventionellen Streckenvortrieb kam es zu Wasserzutritten aus drei Sprengbohrlöchern, die eine alte Bohrung getroffen hatten. Aufgrund des Risikos eines Lösungszutritts durch diese Bohrung wurde diese mit einem Zement mit normaler Körnung injiziert und somit verschlossen.

Tab. 10: Zusammenstellung von In-Situ und Laborversuchen zur Untersuchung der Kontaktfuge sowie zu Anforderungen an Injektionsmittel und Baustoffe für den Einsatz im Salinar.

Literatur	In-Situ Versuche							Laborversuche							
Abkürzungen: SB= Salzbeton SOB= Solebeton MgO= Feinstmagnesiabinder Z= Feinstzement B= ZK-Blitumen KH= Kunstharz BF= Betonierfuge ZG= Zementinjektionsmittel KFP= Kontaktfuge Plexiglas WG= Wassergras	Kontaktfugenbildung und Ausbildung		Permeabilitätsuntersuchungen in der Kontaktfuge (Bohrloch (BO) und Oberflächenpacker (OFFP))			Injektionen		Kontaktfuge			Rheologie			Injektionsversuche mit den 5 ausgewählten oder ähnlichen Injektionsmitteln	
	Haftzugestigsuchungen	Optische Auswertung des Kontaktbereichs	Permeabilität im Kontaktbereich (nicht injiziert)	Permeabilität im Kontaktbereich (injiziert)	Oberflächenpacker am Stoß	Kontaktbereich	ALZ	Bohrkernen an Auswertung von Schlitzen	Spaltzugversuche	Viskositäts-/Zeitverläufe	Spalteindringversuche	Weitere rheologische Kennwerte	Injektion Kontaktfuge Salz/Baustoff	Probekörper (z.B. Sand oder Betonierfuge)	
Summe der Einträge	5	4	3	3	1	3	3	3	1	1	1	2	0	3	
Kaledin [41]			OFF	OFF+KH	KH					B				BF+B	
DBE/ERAM P 192 [28]															
Ahrens, Onofrei [42]							Z								
Knoll et. al./Carla Teil 2 [31]		B	OFF B+KH	OFF B+KH		B+KH									
Kudla, Dahlhaus [15]															
Krauke/ERAM P 174 [44]								X							
Mauke, Laske/ERAM P255 [23]															
Krauke, Fließ/ERAM P 266 [34]	X MgO														
DBE/ERAM G 296 [45]	X SB														
Dahlhaus, Hauke [46]															
Eyermann, Sambeek [37]															
Gläß, Mauke, Eilers [32]		X	BO												
Wakeley, Burkes [47]	X ZG+ Anhydrit/Halit														
Mischo [48]															
Morsleben Großversuch (2010) [49]		X Z		BO		Z		X	X						
Hochschule-Ostwestfalen-Lippe [50]						Z						Z		KFP+Z	
Funehag, Axelsson [51]										WG					
Vogel [52]												WG			
Bollingerferhr, von Borstel et. al. [53]							WG	X						Bohrkern + WG	
Gruner, Kawka, Knoll [54]													B 30 µm		
Fischle [40]	X KH	X					KH		X						
Heydorn et. al. [101]															



Die im Rahmen der in Tab. 10 zusammenstellten und bisher im Rahmen von Forschungstätigkeiten durchgeführten Versuche im Labormaßstab lassen sich bezüglich ihrer Forschungsschwerpunkte in drei Gruppen unterteilen. Dies sind zum einen Untersuchungen die an Kontaktfugen durchgeführt wurden, rheologische Untersuchungen an Injektionsbaustoffen sowie Injektionsversuche im Labormaßstab. Von den drei aufgeführten Gruppen wurden im Rahmen bisheriger Forschungstätigkeiten die meisten Untersuchungen hinsichtlich des Kontaktbereichs zwischen hydraulisch abbindenden Baustoffen und dem Salzgebirge durchgeführt. Im Detail umfassen die durchgeführten Untersuchungen Permeabilitätsmessungen, Auswertungen von Dünnschliffen sowie Spaltzugversuche.

Um das Fließverhalten einzelner Injektionsmittel zu untersuchen wurden rheologische Untersuchungen durchgeführt. Hierbei wurden für zwei Materialien (Bitumen und Natronwasserglas) zeitabhängige Viskositätsverläufe ermittelt, jedoch erfolgten die Messungen nicht bei bergbautypischen Temperaturen. Für Bitumen wurde zudem im Rahmen eines Spalteindringversuchs die minimale Spaltöffnungsweite in die dieses Injektionsmittel noch eindringen kann ermittelt. Des Weiteren wurden für einen Feinstzement sowie Natronwasserglas weitere rheologische Kenndaten wie z.B. die Marshtrichterauslaufzeiten ermittelt. Insgesamt sind die verfügbaren Informationen hinsichtlich rheologischer Untersuchungen an Injektionsmaterialien für den Einsatz im Salinar im Umfang limitiert. Dies gilt insbesondere für die folgenden Aspekte:

- Erfassung rheologischer Kenndaten unter bergbautypischen Temperaturbedingungen.
- Ermittlung rheologischer Kenndaten bisher nur für einzelne Materialien.
- Keine rheologischen Untersuchungen zu sorelbasierten Injektionsmaterialien oder Kunstharzen für den Einsatz im Salinar.
- Keine Ermittlung von rheologischen Kennwerten im Kontakt mit Salz.

Bei der Zusammenstellung der Injektionsversuche, die im Rahmen von veröffentlichten Forschungstätigkeiten durchgeführt wurden, wurden nur solche berücksichtigt, bei denen Injektionsmaterialien für den Einsatz im Salinar eingesetzt wurden. Des Weiteren wurde zwischen Versuchen unterschieden bei denen Probenkörper im Allgemeinen injiziert wurden sowie Versuchen, bei denen der Kontaktbereich zwischen einem hydraulisch abbindenden Baustoff und Salz injiziert wurde. Insgesamt wurden in drei unterschiedlichen Vorhaben Injektionsversuche im Labormaßstab durchgeführt. Hierbei wurden eine Betonierfuge zwischen zwei Sorelbetonplatten mit Bitumen injiziert, eine simulierte Kontaktfuge zwischen Salzbeton und einer Plexiglasscheibe sowie zwei Injektionsversuche mit Natronwasserglas durchgeführt. Bei den Injektionsversuchen ist insbesondere der Versuch von Bollingerfehr und von Borstel [53] zu nennen, da hier ein Steinsalzbohrkern injiziert wurde. Da das Injektionsverhalten von Wasserglas stark durch salinare Lösungen sowie durch den Kontakt mit Salz beeinflusst wird, werden keine Injektionsversuche, die mit Natronwasserglas im Kontakt mit andren Gesteinen/Materialien durchgeführt wurden, in der Zusammenfassung aufgeführt.

Im Rahmen bisheriger Forschungsvorhaben wurden nur in sehr geringen Umfang im Labormaßstab Injektionsversuche durchgeführt. Das Eindringverhalten der Injektionsmaterialien in die Kontaktfuge wird zum einen durch die rheologischen Eigenschaften der Injektionsmaterialien beeinflusst und zum anderen auch durch die Materialien (Baustoff und Salz), mit denen diese in Kontakt kommen. Daher ist es wichtig, Injektionsversuche zur Ermittlung des Eindringverhaltens von Injektionsmaterialien im Kontakt mit der Umgebung, in der diese eingesetzt werden sollen, durchzuführen. Im Rahmen der bisherigen Forschungsvorhaben wurden keine Injektionsversuche durchgeführt, bei denen

Injektionsmittel entlang des Kontaktbereichs zwischen Salz und einem hydraulisch abbindenden Baustoff, der zur Errichtung von Streckenverschlussbauwerken eingesetzt wurde, injiziert.

## **4.2 Anforderungen an Injektionsmaterialien im Salz**

Bevor die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Injektionsversuche durchgeführt werden können, sind geeignete Injektionsmaterialien auszuwählen. Um geeignete Injektionsmaterialien für die Aufgabenstellung der Kontaktfugeninjektion zu ermitteln, ist es sinnvoll, zuerst Anforderungen an die einzusetzenden Injektionsmaterialien aufzustellen. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass die im Rahmen der Kontaktfugeninjektion einzusetzenden Injektionsmaterialien unter den besonderen Randbedingungen, die sich durch den Einsatz der Injektionsmaterialien im Salinar und in einem HAW Endlager ergeben, spezifische Materialeigenschaften aufweisen müssen.

Um die Anforderungen an Injektionsmaterialien zur Kontaktfugeninjektion aufzustellen, wurden im Rahmen dieser Arbeit in einem ersten Schritt Anforderungen an Baustoffe, die bei ähnlichen Aufgabenstellungen eingesetzt werden, aus der Literatur zusammengestellt und gruppiert (Tab. 11). Aus den einzelnen Gruppen beziehungsweise Untergruppen wurden anschließend Anforderungen, die spezifisch für Injektionsmittel zur Kontaktfugeninjektion sind, zusammengestellt.

Es gibt unterschiedliche Aufgabenstellungen bei denen im Salinar Baustoffe mit hohen Anforderungen an die Materialkennwerte eingesetzt werden:

- Baustoffe zur Errichtung von Streckenverschlussbauwerken
- Injektionsmittel zur Permeabilitätsverringerung oder Verfestigung
  - in der Auflockerungszone
  - im Kontaktbereich zwischen Streckenverschlussbauwerk und Salzgebirge

Bei den oben genannten Aufgabenstellungen stehen die eingesetzten Baustoffe in Kontakt mit dem Salinar und müssen eine abdichtende Wirkung aufweisen, wodurch sich teilweise ähnliche Anforderungen an die zur Erstellung sowie Abdichtung von Streckenverschlussbauwerken einzusetzenden Baustoffe ergeben. Diese Anforderungen wurden in unterschiedlichen Planungsdokumenten und Forschungsvorhaben aufgestellt und werden in Tab. 11 zusammenfassend dargestellt.

Tab. 11: Zusammenstellung der in den Literaturstellen angeführten Anforderungen an Baustoffe und Injektionsmittel für den Einsatz im Salinar. Die einzelnen Anforderungen wurden für eine verbesserte Übersichtlichkeit 5 übergeordneten Gruppen zugeordnet.

Baustoffe				Injektionsmittel		
Literatur	Krauke/ERAM P 174 [44]	DBE/ERAM G 296 [45]	Mischo [48]	Kaledin [41]	Ahrens, Onofrei [42]	Eyermann [37]
Zusätzliche Informationen (Art der Anforderung)	Verfüllung untertägiger Bohrungen mit Magnesiabinder	Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen - Salzbeton M2	Definition der Anforderungen an einen geeigneten Dammbaustoff für Dammbauwerke im Salinar	Kunstharze (Allgemeine Materialanforderungen für eine langzeitstabile Abdichtung gegenüber Salzlösungen)	Zementbasierte Injektionsmittel zur Abdichtung der Auflockerungszone im Salz	Injektionsmittel für den Einsatz im Salinar im allgemeinen
Rheologische Anforderungen						
Fließfähigkeit	Pumpfähigkeit über längere Strecken und sehr gute Fließeigenschaften	Der Fließwinkel beträgt $\leq 2,5^\circ$		niedrige Viskosität	Muss in Mikrorisse mit Öffnungsweiten unter $100\ \mu\text{m}$ eindringen können. 90 % der Partikel müssen kleiner als $10\ \mu\text{m}$ sein.	Vorteilhafte rheologische Eigenschaften (Viskosität, Streckgrenze annehmbare Topfzeit, annehmbare Aushärtezeit)
Verarbeitung		Salzbeton lässt „frisch-in-frisch“ zu	Eignung zum maschinellen Einbringen	lange Topfzeit (über 1 Stunde)	Injizierbarkeit über 3 Stunden ohne Agglomierung	
Mechanische Anforderungen						
Festigkeit	Einaxiale Druckfestigkeit: 15 MPa (z.Z. keine Obergrenze)	Zugfestigkeit Beton > Haftzugfestigkeit Kontaktzone Beton-Salz	Druckfestigkeit geringer als die des umliegenden Gebirges		Hohe Druckfestigkeit	Eine Druckfestigkeit, die der des umgebenden Salzgebirges ähnlich ist
	Einaxiale Zugfestigkeit: >1 MPa zentrische E-Modul: 5.000 MPa < 25.000 MPa	Druckfestigkeit $\leq 18\ \text{MPa}$ Zugfestigkeit $\leq 1,25\ \text{MPa}$				
Verformungsverhalten	Kriechverhalten: stationäre Kriechrate möglichst wie Steinsalz		Funktionsbeständigkeit der Dichtelemente bei für das Salinar typischen Konvergenzraten			Möglichkeit der „Selbstheilung“ von Rissen
Schwinden		Autogenessschwinden unter $0,5\ \text{mm/m}$ Trocknungsschwinden (Zeitraum nach 56 Tagen) $\leq 0,2\ \text{mm/m}$		kein oder sehr geringes Schwindmaß	Volumenstabil: Volumenabnahme von unter 1 % bei 50% relativer Luftfeuchtigkeit	

Hydraulische Anforderungen						
Permeabilität	kf-Werte zwischen $10^{-8}$ bis $10^{-12}$ m/s (das entspricht ca. $1 \cdot 10^{-14}$ bis $1 \cdot 10^{-18}$ m <sup>2</sup> )	Permeabilität geringer $10^{-19}$ m <sup>2</sup>	Geringe Permeabilität ( $< 10^{-16}$ m <sup>2</sup> )			Niedrige Permeabilität
Porosität		Porosität zwischen 15 und 25 %	Frühdichtigkeit Einbauzeitpunkt bei Gas- und Laugenandrang sowie Langzeitdichtigkeit gegen Gase und Laugen	keine Porosität des erhärteten Materials		
Chemische Anforderungen						
Funktionalität im Salinar		Keine Anlöse- oder Umlöseprozesse durch den Salzbeton	Abbindefähigkeit und Funktionstüchtigkeit im salinaren Milieu sowie Alterungsbeständigkeit (mehrere Hundert Jahre)	keine chemische Reaktionen zwischen dem Dichtmaterial und den salinaren Komponenten (ins besonders Salzlösungen);		
Beständigkeit gegenüber salinaren Lösungen		Das Feststoffvolumen des Salzbetons ohne Porosität, das durch einen Kubikmeter Mg-gesättigter Lösung bis zur vollständigen Zerstörung der CSH-Phasen umgesetzt werden kann sollte $\leq 3$ m <sup>3</sup> betragen.	Laugenbeständigkeit (NaCl-gesättigt sowie stark MgCl <sub>2</sub> und CaSO <sub>4</sub> -haltig)	Unlöslich: (möglichst geringer Gehalt an Calciumhydroxid, welches die löslichste Komponente von Beton ist.	Hoher Widerstand gegenüber chemischen Reaktionen und Korrosion	
Abgabe von Überschusslösung/Bluten		Abgabe von Überschusslösung nur im beschränkten Maße		keine freien Lösungsmittel (Verflüchtigung der leichten Fraktionen der Lösungsmittel)	Niedriger Wassergehalt: Minimaler Wasser/Zement (W/Z) Wert und kein Bluten	Kein Bluten (Abgabe von Überschusslösung beim Abbinden)
Weitere			Abbindeverhalten an das umgebende Salzgebirge		Niedriger Anteil an Fließmitteln, da diese zu Volumenverringern beim Abbinden führen können.	
			Quelldruck und Quellvermögen			
			Gesundheitliche Eignung			
Thermische Anforderungen						
Einsatzbereich	Temperaturbeständigkeit < 80°C		Funktionstüchtigkeit bei Temperaturen (> 40° C)			
Temperaturentwicklung beim Abbinden		Obergrenze des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten bei $4,0 \cdot 10^{-5}$ 1/K (Entspricht dem Wert für Steinsalz)				
		Geringe Adiabate Temperaturerhöhung				

Die in Tab. 11 zusammengestellten Anforderungen wurden in den jeweiligen Dokumenten für zwei unterschiedliche Aufgabenstellungen (Baustoff für Streckenverschlussbauwerke sowie Injektionsmaterialien) erarbeitet. Sie enthalten daher neben allgemeinen Anforderungen an Baustoffe im Salinar auch für die jeweilige Aufgabenstellung spezifische Anforderungen, die für Injektionsmittel jedoch nicht relevant sind. Eine solche Anforderung ist beispielsweise die rheologische Anforderung eines Fließwinkels von unter 2,5 Gon an Baustoffe für Streckenverschlussbauwerke.

Die Anforderungen an Injektionsmittel zur Injektion des Kontaktbereichs zwischen dem Baustoff des Streckenverschlussbauwerks und dem anstehenden Gebirge lassen sich in fünf verschiedene Kategorien einteilen:

- Rheologische Anforderungen
- Mechanische Anforderungen
- Hydraulische Anforderungen
- Chemische Anforderungen
- Thermische Anforderungen

Über die fünf oben genannten Anforderungen hinaus ergeben sich auch aus der Anwendung der Injektionsmittel weitere Anforderungen. So müssen die Injektionsmittel eine Zulassung nach Gesundheitsschutz-Bergverordnung (GesBergV) aufweisen, um für den Einsatz untertage zugelassen zu sein. Des Weiteren müssen die Injektionsmaterialien transport- und lagerfähig sein.

Im Folgenden wird die Bedeutung der einzelnen ausgewählten Anforderungen hinsichtlich der Erreichung des Ziels der Verfüllung und Abdichtung von Wegsamkeiten im Kontaktbereich Streckenverschlussbauwerk/Salzgebirge mit den zu untersuchenden Injektionsmitteln erläutert.

### **Rheologische Anforderungen**

Die untersuchten Baustoffe sollen zur Injektion der Kontaktfuge zwischen Streckenverschlussbauwerk und Salzgebirge eingesetzt werden. Damit es den untersuchten Stoffen möglich ist, in die Wegsamkeiten der Kontaktfuge einzudringen, müssen diese aufgrund der zu erwartenden sehr geringen Spaltöffnungsweiten von unter 100 µm sehr gut fließfähig sein. Um die Fließfähigkeit der untersuchten Materialien beurteilen zu können, sollen die Viskosität, die Kontaktwinkel im Kontakt mit Steinsalz sowie die Oberflächenspannung herangezogen werden.

Neben der Fließfähigkeit ist auch die Verarbeitbarkeit von besonderer Bedeutung, wobei als Maß für die Verarbeitbarkeit die Topfzeit verwendet wird. Die Topfzeit gibt die Zeit nach dem Anmischen des Baustoffes an, in der dieser verarbeitbar ist. Hierbei werden längere Topfzeiten der einzelnen Baustoffe als vorteilhaft angesehen.

Ein weiterer wichtiger Materialkennwert für Injektionsmittel ist die Partikelgröße der Feststoffe. Mit abnehmender Partikelgröße können diese besser in Risse mit geringeren Spaltöffnungsweiten eindringen. In DIN EN 12715 [61] ist ein Verhältnis von ungefähr 1:3 zwischen größter Partikelabmessung und der Rissweite angegeben, in die die Partikel noch eindringen können. Für die Injektion von Wegsamkeiten mit geringen Öffnungsweiten eignen sich daher entweder partikelfreie Injektionsmittel oder Suspensionen mit möglichst kleinen Feststoffpartikeln.

## **Mechanische Anforderungen**

Nach der Errichtung des Streckenverschlussbauwerks wird dieses infolge des Gebirgsdrucks sowie durch Zwangsverformungen aus Bauwerk/Baugrundwechselwirkungen (z.B. Verformungsbehinderungen oder Setzungen) mechanisch beansprucht[45]. Die Strecken vor und hinter dem Verschlussbauwerk werden nach dessen Errichtung mit Salzgrus verfüllt, auf den das Salzgebirge aufläuft, wobei der Salzgrus kompaktiert wird. Das Bauwerk weist ein anderes Verformungsverhalten als der unkompaktierte Salzgrus auf, wodurch es bei der Kompaktion und Setzung des Salzgruses zur mechanischen Belastung des Streckenverschlussbauwerks kommen kann. Um der mechanischen Beanspruchung in dieser Zeit durch die Konvergenz zu widerstehen, ohne dass eine Beeinträchtigung der abdichtenden Funktion des injizierten Baustoffes innerhalb der Kontaktfuge entsteht, ergeben sich Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften der Injektionsmittel.

An erster Stelle sind hierbei die Druck- bzw. Zugfestigkeit der Injektionsmittel sowie die Haftzugfestigkeit zwischen Injektionsmittel und Baustoff und Gebirge zu nennen. Die Auflast des überlagernden Gebirges sowie die auftretenden Zwangsumformungen können sowohl zu einer Druckbeanspruchung als auch lokal zur Ausbildung von Zugkräften zwischen Bauwerk und Gebirge führen. Durch eine hohe Zug- und Druckfestigkeit der verwendeten Injektionsmittel kann bei diesen Belastungen eine Beeinträchtigung der abdichtenden Funktion vermieden werden.

Falls es zu Bewegungen im Kontaktbereich zwischen Bauwerk und Gebirge nach der Injektion der Kontaktfuge kommt, z.B. infolge der Konvergenz des auflaufenden Gebirges, ist es vorteilhaft, wenn das injizierte Material plastisch und ohne Rissbildung auf diese Bewegung reagiert.

Zudem soll das Injektionsmittel kein oder allenfalls nur ein geringes Schwindverhalten aufweisen, da es durch Schwinden zur Ausbildung von Wegsamkeiten in bereits injizierten Bereichen der Kontaktfuge kommen kann.

## **Hydraulische Anforderungen**

Im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben[45] wurde die Anforderung an Baustoffe für Streckenverschlussbauwerke gestellt, dass diese eine Permeabilität von unter  $k \leq 10^{-19} \text{ m}^2$  aufweisen. Diesen Wert müssen die einzusetzenden Injektionsmaterialien nicht aufweisen, jedoch sollten diese möglichst geringe Permeabilitäten aufweisen, damit diese die Wegsamkeiten in der Kontaktzone möglichst effektiv abdichten können.

## **Thermische Anforderungen**

Aufgrund des wesentlich geringeren Volumens und der schnelleren Wärmeabfuhr in das umliegende Gebirge kommt der Abbinde-temperatur der Injektionsmaterialien eine untergeordnete Rolle zu. Jedoch ist zu beachten, dass durch hohe Einbringtemperaturen (z.B. Heißbitumen) oder durch hohe Temperaturentwicklungen beim Polymerisationsprozess von Harzen einzelne Salzminerale geschädigt werden können. Als Beispiel ist hier Carnallit zu nennen, der bei Temperaturen von über 160°C Salzsäuredämpfe freisetzt. Jedoch kommt es auch schon bei geringeren Temperaturen zu einer Schädigung dieses Minerals. Bei Temperaturen von über 85°C zerfällt Carnallit unter der Freisetzung von Kristallwasser [41; 54].

## Chemische Anforderungen

Eine wichtige Anforderung an das einzusetzende Injektionsmittel ist, dass dieses chemisch stabil ist im Kontakt mit den Baustoffen des Streckenverschlussbauwerks, den Salzen der Streckenkontur sowie gegenüber zutretenden Lösungen. Die möglichen Salze der Streckenkontur sowie mögliche Zusammensetzungen von an das Streckenverschlussbauwerk herantretender Lösungen wurden in Kapitel 3.2.1 „Salzgebirge“ vorgestellt. Die chemische Kompatibilität zwischen dem Injektionsmedium, dem Baustoff des Streckenverschlussbauwerks sowie dem Salzgebirge ist vom Betrachtungszeitraum abhängig.

Im Forschungsvorhaben ISIBEL wird die Aussage getroffen, dass die Gewährleistung der Funktion des Streckenverschlussbauwerks über dessen Funktionszeitraum nachgewiesen werden muss [108]. Die Dauer des Bemessungszeitraumes der Streckenverschlüsse ist abhängig vom Zeitpunkt des Erreichens einer hinreichenden Kompaktion des Salzgruses. Dieser gewährleistet den sicheren Einschluss der Abfälle[108]. Das bedeutet, dass die Baustoffe des Streckenverschlussbauwerks als auch die Injektionsmaterialien, die zur Abdichtung des Kontaktbereichs eingesetzt werden, lediglich solange unter den herrschenden Bedingungen beständig sein müssen, bis der Salzgrusversatz den sicheren Einschluss der Abfällen gewährleistet. Der Betrachtungszeitraum, für den die chemische Kompatibilität der eingesetzten Materialien erforderlich ist, beträgt somit mehrere hundert Jahre bis zu einigen Jahrtausenden.

### 4.3 Verfügbare Injektionsmaterialien für den Einsatz im Salz

Zur Abdichtung der Kontaktfuge eignen sich die Injektionsmaterialien, die im Kapitel 4.2 „Anforderungen an Injektionsmaterialien im Salz“ aufgestellten Anforderungen erfüllen. Um diese Anforderungen zu erfüllen, müssen die Injektionsmaterialien gewisse Materialeigenschaften aufweisen:

- Lösungsunfähig gegenüber den Salzmineralen der Streckenkontur
- Beständig gegenüber salinaren Lösungen
- Geringe Partikelgröße, um in Wegsamkeiten mit Öffnungsweiten unter 100 µm eindringen zu können
- Möglichst geringe Abbinde Temperaturen
- Niedriges Schwindverhalten
- Mechanische Stabilität gegenüber Verformung
- Gute Haftzugfestigkeit im Kontakt mit Salz
- Ausreichend lange Verarbeitungszeiten

Üblicherweise werden zwei Gruppen von Injektionsmaterialien unterschieden. Dies sind zum einen partikelgestützte Injektionsmaterialien und zum anderen partikelfreie Injektionsmaterialien. Partikelfreie Injektionsmaterialien sind feststofflose Flüssigkeiten, die nach einem gewissen Zeitraum erhärten. Als partikelhaltige Injektionsmaterialien werden Suspensionen, also mit Feststoffen beladene Flüssigkeiten bezeichnet.

Als partikelhaltige Injektionsmittel werden zu Injektionszwecken üblicherweise Zemente oder Feinstzemente eingesetzt. Die Feinstzemente weisen eine wesentliche geringere Korngröße als Zemente auf und können daher in Wegsamkeiten mit geringeren Öffnungsweiten eindringen. Um zu

gewährleisten, dass partikelgestützte, hydraulisch abbindende Injektionsmaterialien chemisch kompatibel sind mit dem Salzgebirge, zutretenden Lösungen sowie dem Baustoff des Streckenverschlussbauwerks, müssen diese in Abhängigkeit der Standortsituation ausgewählt werden. Als partikelgestützte Injektionsmaterialien zur Kontaktfugeninjektion eignen sich sowohl fein aufgemahlene Salzbetone als auch sorelbasierte Materialien. Diese enthalten als Bindemittel Magnesiumoxid und als Anmischflüssigkeit  $\text{MgCl}_2$ -Lösung. Um in die Wegsamkeiten mit geringen Öffnungsweiten im Bereich der Kontaktfuge eindringen zu können, müssen die Injektionsmaterialien geringe Korngrößen ( $d_{95} < \text{ca. } 30 \mu\text{m}$ ) aufweisen.

Ein speziell für den Einsatz im Kontakt mit leichtlöslichen Kalisalzen entwickeltes Zweikomponenten Bitumen, das beim Einbau keine höheren Temperaturen als die Umgebung aufweist, ist ein ungewöhnliches und wenig erprobtes partikelgestütztes Injektionsmaterial dar. Zwar werden Bitumen bzw. Asphalt bei der Errichtung von Schachtverschlussbauwerken zur Errichtung einzelner Dichtelemente eingesetzt. Jedoch erfolgt der Einbau dieser Materialien meist als Heißeinbau, da Bitumen/Asphalt mit sinkender Temperatur seine Fließfähigkeit verliert. Besonders im Kontakt mit Kalisalzen ist der Einsatz von Heißbitumen nicht möglich, da es unter anderem zur Freisetzung von Kristallwasser kommen kann. Aus diesem Grunde wurde von der TU Freiberg ein spezielles Bitumen entwickelt und im Rahmen von Injektionsversuchen im Forschungsvorhaben CARLA erprobt, dass bei Temperaturen von  $20^\circ\text{C}$  verarbeitbar ist.

Die mit diesem 2K-Bitumen im Rahmen des Forschungsvorhabens CARLA [27] durchgeführten Injektionsversuche haben gezeigt, dass mit speziellen, gut fließfähigen Kaltbitumen im Rahmen von Spalteindringversuchen Öffnungsweiten von  $30 \mu\text{m}$  injiziert werden können. Aufgrund des guten Eindringverhaltens, des plastischen Materialverhaltens und der Kompatibilität mit unterschiedlichen Salzen und Baustoffen erscheint das Kaltbitumen geeignet zur Abdichtung der Kontaktfuge.

Üblicherweise im Rahmen von Verfestigungs- und Abdichtinjektionen eingesetzte partikelfreie Injektionsmaterialien sind Kunstharze sowie Wassergläser. Um Kunstharze im Kontakt mit Salzmineralen einsetzen zu können, muss vorab deren Eignung für den Einsatz im Salinar nachgewiesen sein. Bei einigen Kunstharzen kann die Polymerisation im Kontakt mit dem Salinar bzw. salinaren Lösungen beeinträchtigt sein, was zu geringen Festigkeiten und Haftzugfestigkeiten sowie einer eingeschränkten Erhärtung führt [41]. Daher eignen sich nur einzelne der üblicherweise zu Injektionszwecken eingesetzten Kunstharze für die Kontaktfugeninjektion.

Kunstharze werden trotz der Schwierigkeiten bezüglich des Nachweises der Beständigkeit über lange Zeiträume im Rahmen dieser Arbeit betrachtet, da sie aufgrund der Partikelfreiheit ein gutes Eindringverhalten in Wegsamkeiten mit geringen Öffnungsweiten aufweisen. Zudem lassen sich Kunstharze im Kontakt mit Sorelbeton als auch Salzbeton sowie im Kontakt mit Kalisalzen einsetzen. Insbesondere die Möglichkeit Kunstharze im Kontakt mit leichtlöslichen Kalisalzen einzusetzen, ist von Bedeutung, da für andere partikelfreie Injektionsmaterialien (Natronwasserglas) der experimentelle Nachweis, dass diese im Kontakt mit leichtlöslichen Kalisalzen eingesetzt werden können, noch nicht erbracht wurde.

Im Vergleich zu partikelgestützten Injektionsmaterialien oder Kunstharzen wird Natronwasserglas im Rahmen von Injektionsarbeiten zwar im geringeren Umfang eingesetzt, gehört jedoch trotzdem zu den üblicherweise eingesetzten Injektionsmaterialien. Als gängiges Verfahren ist hier das Joosten-Verfahren zu nennen, bei dem das Natronwasserglas mit einem Härtemittel zusammen injiziert wird



[52,102,103]. Aufgrund von Reaktionen zwischen dem Salzgebirge und Natronwasserglas, auf die im Folgenden noch eingegangen wird, kann Natronwasserglas bei Injektionsarbeiten im Salinar als Einzelkomponente ohne Härtemittel injiziert werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es zwei Materialgruppen gibt, die sich prinzipiell für den Einsatz im Salinar und zur Kontaktfugeninjektion eignen:

#### Partikelhaltige Injektionsmaterialien

- Feinst aufgemahlene Sorelbetone
- Feinst aufgemahlene Salzbetone
- Kaltbitumen

#### Partikelfreie Injektionsmaterialien

- Natronwasserglas
- Kunstharze

Innerhalb dieser Materialgruppen sind teilweise mehrere unterschiedliche Injektionsmaterialien verfügbar. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurden Injektionsmaterialien ausgewählt, für die bereits im Rahmen anderer Arbeiten/ Forschungsvorhaben Injektionsversuche an Streckenverschlussbauwerken oder zur Vergütung von Auflockerungszonen im Salz durchgeführt wurden und die prinzipielle Eignung der Materialien aufgezeigt wurde (Tab. 9 und Tab. 10). Die im Rahmen dieser Untersuchungen eingesetzten und nachfolgend als geeignet erachteten Materialien sind in Tab. 12 zusammengestellt und kommen bei den weiteren Versuchen als Stellvertreter für die fünf Materialgruppen zum Einsatz.

Von den ausgewählten Injektionsmitteln sind drei partikelgestützt und zwei partikelfrei (Tab. 12). Da das Eindringverhalten von partikelgestützten Injektionsmitteln aufgrund des Durchmessers der in den Baustoff Suspensionen enthaltenen Partikeln auf Risse/Wegsamkeiten begrenzt ist, deren Öffnungsweite ungefähr dem dreifachen [61] des  $d_{90}$ -Werts der in der Suspension enthaltenen Partikel begrenzt ist, weisen partikelgestützte Injektionsmittel eine untere Anwendungsgrenze auf, ab der es aufgrund der Partikelgröße nicht möglich ist, diese zu injizieren. Für die Injektion von Wegsamkeiten, die Öffnungsweiten unterhalb der Anwendungsgrenze der partikelgestützten Injektionsmaterialien aufweisen eignen sich partikelfreie Injektionsmittel, da diese nicht durch enthaltene Partikel in Ihrem Eindringverhalten beeinflusst werden.

Tab. 12: Zusammenstellung der fünf ausgewählten Injektionsmittel

	partikelgestützt			partikelfrei	
Materialgruppe	Feinst-magnesiabinder	Feinstzement	Kaltbitumen	Wasserglas	Kunstharz
Injektionsmittel	IM 4+	Ultrafin 12	2K-Bitumen	Wasserglas 37/40	Denepox 40
Hersteller	K-UTEC	HeidelbergCement	TU Freiberg		De Neef Construction Chemicals

Im Folgenden werden die Injektionsmittel, die für die Kontaktfugeninjektion ausgewählt wurden vorgestellt. Hierbei wird auf die Materialeigenschaften der Injektionsmittel, wie z.B.

Zusammensetzungen, Festigkeiten, Abbindeverhalten sowie die Beständigkeit unter salinaren Bedingungen eingegangen.

### 4.3.1 Partikelgestützte Injektionsmaterialien

Feinstmagnesiabinder IM 4+

Der Injektionsmörtel IM 4+ der Firma K-UTEC ist ein fein aufgemahlener Magnesiazement mit einem  $d_{90}$ -Wert im Bereich von 15-20  $\mu\text{m}$ [62]. Aufgrund des verwendeten Magnesiazements sowie der S30-Lösung eignet sich dieses Injektionsmittel für den Einsatz im Kontakt mit Kalisalzen. Der IM 4+ ist langzeitbeständig im Kontakt mit hochkonzentrierten  $\text{MgCl}_2$  sowie  $\text{MgSO}_4$ -Lösungen, jedoch ist er nicht lösungsstabil bei der Durchströmung mit Wasser oder gering mineralisierten Lösungen[62]. Neben der geringen Korngröße zeichnet sich der IM 4+ dadurch aus, dass er im nicht eingespannten Zustand eine Volumenausdehnung von bis zu 10 Vol.-% aufweist. Das Mischungsverhältnis der verwendeten Rezeptur wird in Tab. 13 gegeben.

Tab. 13: Informationen zur Zusammensetzung und zum Mischungsverhältnis von „IM 4+“[62]

<b>Mischungsverhältnis IM 4+</b>	
IM	56,70 Gew.-%
S30-Lösung	42,79 Gew.-%
Woerment	0,51 Gew.-%
<b>Zusammensetzung IM</b>	
MgO < 20 $\mu\text{m}$	20-30 Gew.-%
Dolomitmalkhydrat < 20 $\mu\text{m}$	0-1 Gew.-%
Brucit < 20 $\mu\text{m}$	0-1 Gew.-%
Anhydrit < 20 $\mu\text{m}$	70-80 Gew.-%

Der Injektionsmörtel IM 4+ enthält ausschließlich Inhaltsstoffe, die gemäß Gesundheitsschutz-Bergverordnung § 4 Abs. 1 für den untertägigen Einsatz zugelassen sind. Die Vorgängermörtel (IM 3 und IM 3-mod) wurden erfolgreich im Vorhaben CARLA sowie auf der Schachtanlage Asse II eingesetzt[31; 34].

Feinstzement Ultrafin 12:

Ultrafin 12 ist ein zementbasiertes Feinstbindemittel, das im Kontakt mit Steinsalz eingesetzt werden kann. Neben dem Ultrafin 12 sind eine Reihe verschiedener Feinstzemente unterschiedlicher Hersteller verfügbar, die aufgrund ihrer kleinen Partikelgrößen zum Injizieren von Wegsamkeiten mit geringen Öffnungsweiten verwendet werden können. Der Feinstzement Ultrafin 12 wurde ausgewählt, da dieser für die Nachvergütung des In-Situ Versuchs im ERAM 2010[50] verwendet wurde. Durch die Verwendung von NaCl-haltigen Anmischflüssigkeiten ist es möglich, für das Injektionsmittel eine Lösungsstabilität gegenüber Steinsalz einzustellen, wobei hierfür üblicherweise eine 90% NaCl-gesättigte Lösung verwendet wird. Zudem kann das Fließverhalten der Suspension über den Wasser-/Feststoffgehalt beeinflusst werden.

Tab. 14: Rheologische Daten von Ultrafin 12 bei unterschiedlichen Suspensionsdichten[63]. Die dargestellten Werte beziehen sich auf Suspensionen die mit Leitungswasser hergestellt wurden.

Labor-Nr.	W/F-Wert [-]	Marshzeit ( $t_0$ ) [s]	Suspensionsdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wasserabsetzen [%]
2010-07-615	2,0	30	1.291	4,2
2010-07-616	1,8	32	1.319	3,5
2010-07-617	1,6	32	1.355	2,3
2010-07-618	1,4	33	1.395	0,7
2010-07-619	1,2	36	1.447	0,0
2010-07-620	1,0	41	1.512	0,0

Die Auswahl des Wasser/Feststoffwertes des Baustoffes erfolgte anhand der Daten in Tab. 14. In dieser Tabelle wird das Sedimentationsverhalten von Ultrafin 12 Suspensionen mit unterschiedlichen W/F-Werten 2 Stunden nach dem Anmischen dargestellt. Mit steigendem Wassergehalt neigt die Suspension zum Sedimentieren (Wasserabsetzen). Für die Versuche wurde eine Suspension mit einem Wasser/Feststoffwert von 1,4 ausgewählt, da diese bei einer niedrigen Marshzeit nur ein geringes Wasserabsetzen aufweist. Bei der für die Versuche verwendeten Rezeptur wurden keine Additive zur Suspension hinzugegeben.

Um die Anmischflüssigkeit für die Suspension mit der 90 %-NaCl gesättigten Lösung herzustellen, wurden 322 Gramm NaCl in einem Liter Wasser bei 20° C gelöst. Sowohl bei der mit Leitungswasser als auch bei der mit 90%-NaCl gesättigter Lösung angemischten Suspension wurde das gleiche Volumen an Flüssigkeit verwendet. Da die verwendeten Flüssigkeiten unterschiedliche Dichten haben, betrug der W/Z-Wert bei der Suspension mit Leitungswasser 1,4 und bei der Suspension mit 90%-NaCl gesättigter Lösung 1,65.

## 2K-Bitumen

Im Bauwesen, Wasser- und Deponiebau kommt Bitumen/Asphalt als Baustoff zu Abdichtungszwecken oft zum Einsatz. Der Hauptvorteil dieses Baustoffes liegt darin, dass er plastisch auf Deformationen reagiert und unter Beanspruchung erst bei starker Deformation zur Rissbildung neigt. Üblicherweise werden Heißeinbauverfahren verwendet, die jedoch für die Kontaktfugeninjektion im Salinar nicht eingesetzt werden können, da es bei der Abkühlung des Bitumens zu starken Volumenkontraktionen kommt, das Verfahren nicht immer genehmigungsfähig ist und spezielle Kalisalze bei den Einbautemperaturen nicht stabil sind und unter der Abgabe von Kristallwasser zerfallen[54].

Daher wurde vom Institut für Bergbau der TU Freiberg ein spezielles Zweikomponentenbitumen (2K-Bitumen) entwickelt, das unter Umgebungstemperatur verarbeitet und injiziert werden kann. Das 2K-Bitumen besteht zum einem aus einem speziell aufgemahlenen Hartbitumen (H 165/175); die zweite Komponente ist ein entaromatisierter Kohlenwasserstoff (Hydroseal G232 H). Die beiden Bestandteile werden im Massenverhältnis von 48 zu 52 (Hartbitumen zu Hydroseal) miteinander vermischt[54].

Entscheidend für die Eigenschaften des 2K-Bitumens ist die Korngrößenverteilung des eingesetzten Hartbitumens. Folgende Information wurde hierzu von Dr. Gruner, einem Mitarbeiter der TU Freiberg gegeben: „Je kleiner die Korngröße des Hartbitumens ist, desto schneller steift es an und desto schwieriger ist das Rühren. Um die Topfzeit auf ca. 15 Minuten zu verlängern, wurde für technische Anwendungen die Körnung in Richtung  $d_{50} \leq \text{ca. } 150 \mu\text{m}$  verschoben. Die maximale Korngröße sollte

aber dann 0,5 mm nicht übersteigen. Mit größerem Material wird eine Entmischung beobachtet. Sonst findet keine Entmischung oder Sedimentation statt.“ Nähere Informationen zum 2K-Bitumen finden sich in der Patentschrift „Verfahren und Zusammensetzung zum Abdichten von Strecken im Bergbau und/oder eines Baukörpers[54].

Das von der TU Freiberg bereitgestellte gemahlene Hartbitumen enthielt vermutlich durch den Transport einige größere Agglomerate, die sich unter geringer mechanischer Belastung in die einzelnen Partikel zerteilen ließen. Die Agglomerate wurden zerkleinert und anschließend wurde das Hartbitumen mit einer Analysesiebmaschine vom Typ „Haver EML 200 Digital T“ 20 Minuten pro Probe bei einer hohen Schwingungsintensität trocken gesiebt. Hierbei kam es verbreitet zu Anhaftungen des Hartbitumens an den Rändern der Siebe, was zu einem Massenverlust von 13,6 % im Laufe des Siebdurchgangs geführt hat.

Beim Sieben wurde festgestellt, dass sich die Maschen der Siebe mit einer Maschenweite  $\leq 180 \mu\text{m}$  zugesetzt haben. Das bedeutet, dass die Siebdurchgangslinie (Abb. 6) unterhalb dieses Bereichs nicht repräsentativ ist. Die Analyse zeigt jedoch deutlich, dass ca. 25 % des Hartbitumens eine Korngröße von über  $300 \mu\text{m}$  hat.

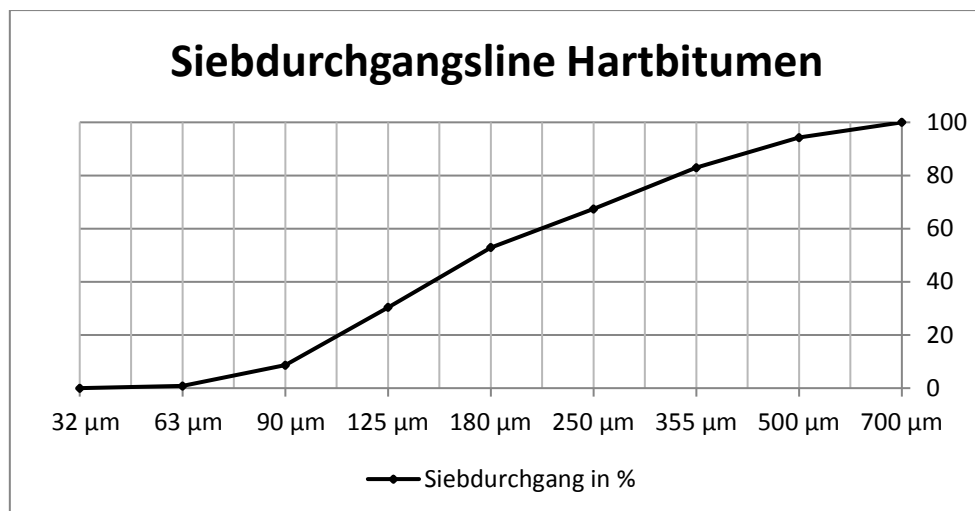


Abb. 6: Siebdurchgangslinie des Hartbitumens

Das 2K-Bitumen wurde bisher unter anderem im Vorhaben CARLA[31] zur Kontaktfugeninjektion eines Versuchsbauwerks eingesetzt und im Rahmen der Dissertation von Kaledin wurde eine Betonierfuge (Neu auf Alt) zwischen zwei MgO-Betonplatten verpresst[41].

#### 4.3.2. Partikelfreie Injektionsmaterialien

Natronwasserglas 37/40:

Als Wasserglas werden glasig erstarrte Schmelzen von Alkalimetallsilikaten sowie deren wässrige Lösungen bezeichnet. Unterschieden wird hierbei zwischen Hart- und Weichgelen, wobei die Weichgele einen Wasseranteil zwischen 66 und 70 Vol.% besitzen und Hartgele 20 bis 30 Vol% Wasser enthalten[65]. Je geringer der Wassergehalt des Wasserglases ist, desto höher ist seine Dichte. Daher werden Wassergläser nach Ihrer Grädigkeit unterschieden, wobei dieser Wert sich auf die Dichte bezieht. Für Injektionen im Salinar werden meist Wassergläser mit einer Grädigkeit von 37/40 Grad

Baumé eingesetzt, was einer Dichte zwischen 1,344 und 1,382 g/cm<sup>3</sup> bei 15° C entspricht. Das Natronwasserglas 37/40 wird aufgrund des im Vergleich zu anderen Wassergläsern geringen SiO<sub>2</sub>-Anteils eingesetzt, da durch einen geringeren SiO<sub>2</sub>-Anteil die Viskosität verringert wird [110]. Zusätzlich zum Natronwasserglas der Grädigkeit 37/40 werden auch Natronwassergläser der Grädigkeit 50/52 bei Injektionen im Salz eingesetzt [110]. Diese haben eine höhere Dichte, eine höhere Viskosität sowie einen höheren SiO<sub>2</sub>-Anteil bzw. einen geringeren Wassergehalt als die Natronwassergläser der Grädigkeit 37/40 [110]. In Tab. 15 sind der Anteil an SiO<sub>2</sub> sowie die Dichte für Natronwassergläser unterschiedlicher Grädigkeit angegeben.

Tab. 15: Kennwerte von Natronwassergläsern mit verschiedenen Grädigkeiten [110].

	SiO <sub>2</sub> [Ma. %]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]
NWG 37/40	27,3	1,34 – 1,38
NWG 40/42	30,0	1,38 – 1,41
NWG 48/50	32,4	1,49 – 1,53
NWG 50/52	34,0	1,55 – 1,56
NWG 58/60	37,0	1,67 – 1,71

Üblicherweise wird Wasserglas entweder als eine Ein- oder Zweikomponenteninjektion injiziert. Bei beiden Verfahren wird das Wasserglas mit einem Erhärtter vermischt. Bei der Einkomponenteninjektion erfolgt das Mischen vor der Injektion und aufgrund der langsamen Reaktion zwischen Wasserglas und Erhärtter kommt es erst nach dem Injizieren zur Erstarrung des Natronwasserglases [102]. Bei der Zweikomponenteninjektion, die auch als Joosten-Verfahren bezeichnet wird, werden das Härtemittel und das Wasserglas nacheinander injiziert und es kommt beim Kontakt der beiden zur Erstarrung des Wasserglases [52]. Üblicherweise werden beim Joosten-Verfahren MgCl<sub>2</sub>- oder CaCl<sub>2</sub>-Lösungen als Härter eingesetzt [103]. Untersuchungen mit Natronwasserglas und unterschiedlich gesättigten NaCl-Lösungen zeigen, dass es auch hier zu einer Gelierung des Natronwasserglases kommt, womit NaCl-Lösungen auch als Härter fungieren [51].

Über die Erkenntnisse mit dem Joosten-Verfahren sowie Ein- und Zweikomponenten Injektionen hinaus gibt es nur wenige Untersuchungen, die sich mit dem Erhärten von Natronwasserglas im Kontakt mit Steinsalz und NaCl-gesättigten Lösungen beschäftigt haben. In Demonstrationsversuchen wird gezeigt, dass es bei der Zugabe von NaCl-Lösungen zu Natronwasserglas zu einer Vergelung und Erhärtung des Wasserglases kommt [89]. Im Rahmen einer zweiten Studie [53] wird gezeigt, dass Natronwasserglas im Kontakt mit NaCl erhärtet. So war es möglich, halbierte Steinsalzkerne mit Natronwasserglas zu verkleben und diese Verbindung wies nach 56 Tagen im Kontaktbereich eine Haftzugfestigkeit von 0,78 MPa auf (Mittelwert aus 6 Versuchen) [53].

Bei Injektionen von Wasserglas im Salinar müssen, im Gegensatz zu den üblichen Injektionsverfahren, daher keine Erhärtter hinzugegeben werden. Da Wassergläser aufgrund ihres Wassergehaltes gegenüber Steinsalz lösungsfähig sind, kommt es zur Erhärtung von Natronwasserglas im Kontakt mit Steinsalz [53]. Eine Injektion mit Wasserglas läuft wie in Abb. 7 dargestellt ab, wo das Wasserglas in einen Spalt im Steinsalz (blau) eindringt. Im Kontakt mit dem Steinsalz wird dieses durch das Wasserglas angelöst und es kommt sofort zur Gelbildung entlang des Kontaktbereichs zwischen Wasserglas und Steinsalz. Die fortschreitende Gelierung und Bildung zunehmend größerer Silikatgruppen, die aus SiO<sub>4</sub>-Tetraedern bestehen, ist in der Abbildung mittels unterschiedlich großer Kugeln dargestellt. Jedoch verbleibt bei andauernder Injektion im Inneren der Wegsamkeit ein Bereich mit unvergelmtem, fließfähigem Wasserglas, der ein Fortschreiten der Injektion ermöglicht. Mit

zunehmender Dauer diffundieren Natrium-Ionen durch die gelierte Schicht und bewirken auch im Inneren der Wegsamkeit eine Aushärtung des Wasserglases, bis sämtliches Wasserglas geliert und die Wegsamkeit abgedichtet ist [53]. Im Laufe des Gelierungsprozesses gibt das Wasserglas eine wässrige Lösung, die sogenannte Synäreselösung ab.

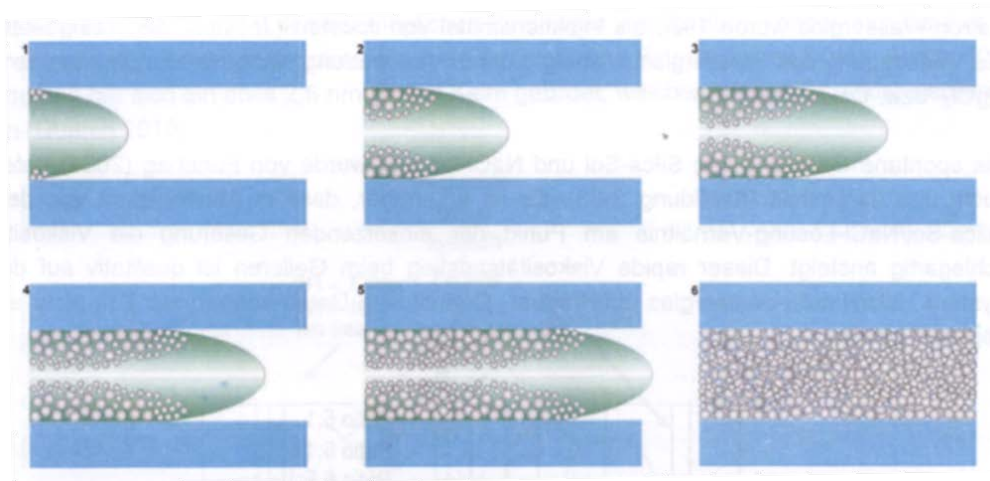


Abb. 7: Modellhafte Darstellung des Ablaufes einer Wasserglasinjektion in eine Wegsamkeit im Steinsalz. Die fortschreitende Injektion dringt immer weiter ein, bis die komplette Wegsamkeit gefüllt ist. Im Kontakt mit dem Steinsalz setzt eine Gelierung des Wasserglases ein, die im Modell durch die unterschiedlich großen Kügelchen dargestellt ist [53].

In zwei Studien [53,89] wurde unter anderem die Gelierung und Bildung von Synäreselösung von Natronwasserglas im Kontakt mit Halit und NaCl-haltigen Lösungen untersucht. Unter Synärese wird eine Form des Alterns von Gelen beschrieben, bei der Lösung aus dem Gel austritt, ohne dass dessen innere Struktur zusammenbricht [89]. Basierend auf den Ergebnissen dieser Untersuchungen wurde die Modellvorstellung für den oben dargestellte Ablauf der Injektion und die darauffolgende Gelierung von Natronwasserglas erarbeitet. Zudem liefern die Untersuchungen Informationen zur Bildung von Synäreselösung bei der Erhärtung von Natronwasserglas.

Wenn das injizierte Wasserglas in Kontakt mit Salz oder salinaren Lösungen tritt kommt es zur Gelbildung. Bei der Gelbildung verketteten sich die Silikatphasen des Wasserglases wobei amorphes Silikatgel sowie sekundärer Halit gebildet werden. Das Silikagel ist ein schneidbarer Feststoff mit geringer mechanischer Festigkeit[89]. Innerhalb der nächsten ca. 30 Tage läuft der Synäreseprozess ab[53]. Hierbei kommt es zu einer weiteren Verkettung der Silikatphasen, wobei Gerüststrukturen gebildet werden. Während des Synäreseprozesses erhöht sich die mechanische Festigkeit des Silikatgels und es kommt zu einer Volumenreduktion des Wasserglases infolge der Abgabe einer wässrigen Synäreselösung[53]. Da das Wasserglas der Härte 37/40 im Vergleich zu anderen Wassergläsern (z.B. Hartgelen) einen relativ hohen Wasseranteil besitzt, ist auch eine merkliche Volumenreduktion infolge der Synärese zu erwarten, wenn das Wasser entweichen oder verdunsten kann. Versuche bei denen Wasserglas in Steinsalzprobenkörper injiziert wurde zeigen jedoch, dass das im Laufe des Synäreseprozesses freigesetzte Wasser entlang von Korngrenzen im Salz migriert und dort als Lösungseinschlüsse im Salz fixiert wird[89] (Siehe Abb. 8).

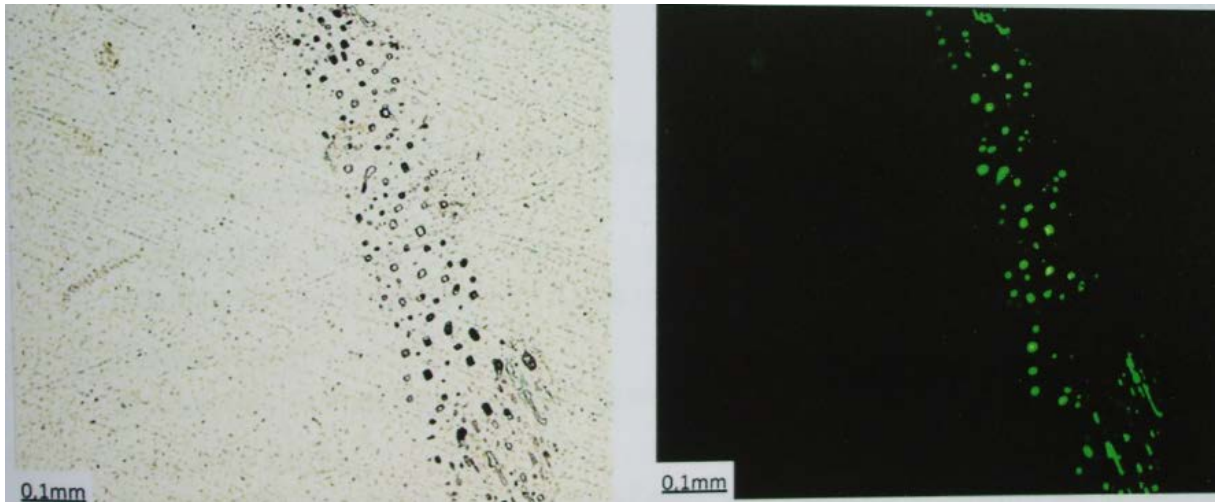


Abb. 8: In Halit fixierte Lösung, die vom Erhärtungsprozess des Silicatgels herrührt. Mit Uranin getracertes Natron-Wasserglas wurde in Steinsalz injiziert, daher die grüne Färbung der Lösungen. Links: parallele Polarisatoren. Rechts: gekreuzte Polarisatoren und Aufnahme unter UV-Licht[89].

Im Rahmen der Versuche bei denen NaCl-Lösung in das Natronwasserglas vermischt wurde (Mengenverhältnis 1:1) zeigte sich, dass sich zunächst ein fester Körper bildete (ein bis zwei Minuten nach dem Zusammenmischen) und sich nachfolgend zunehmend infolge der Synärese Überstandslösung auf dem vergelten Natronwasserglas bildete. 22,5 Stunden nach dem Vermischen des Natronwasserglases mit der NaCl-Lösung hatten sich etwas mehr als 40 ml Synäreselösung gebildet [89]. Ausgewählte Aufnahmen der aus Natronwasserglas und NaCl-Lösung erstellten Probenkörper sind in Abb. 9 dargestellt.



Abb. 9: Oben links: Probenkörper aus Natronwasserglas und NaCl-Lösung (Verhältnis 1:1) 9 Sekunden nach dem Vermischen. Oben rechts: Schneiden des Probenkörpers ein bis zwei Minuten nach dem Vermischen. Mitte links: Probenkörper ca. 1,5 h nach dem Vermischen. Mitte Rechts: Probenkörper nach 3 Stunden. Unten: Probenkörper 19,5 h nach dem Vermischen mit deutlich sichtbarer Synäreselösung.

Die bisherigen Untersuchungen zur Bildung von Synäreselösung beim Erhärten von NWG 37/40 im Kontakt mit Steinsalz und NaCl-Lösungen zeigen zum einen, dass die Synäreselösung im Halit fixiert werden kann. Zum anderen machen die Versuche aber auch deutlich, dass bei der Mischung mit NaCl-gesättigten Lösungen eine deutliche Bildung von Überstandslösung im Laufe des Synäreseprozesses stattfinden kann.

In Versuchen, bei denen unter Tage der konturnahe Gebirgsbereich im Steinsalz mit Wasserglas injiziert wurde, konnte gezeigt werden, dass durch die Wasserglasinjektion eine Verringerung der Permeabilität in diesem Bereich erzielt werden konnte[53].

Die bisher im Rahmen von Forschungsvorhaben durchgeführten Injektionen mit Natronwasserglas im Kontakt mit dem Salinar wurden mit vergleichsweise  $\text{SiO}_2$  armen und wasserreichen Natronwassergläsern der Grädigkeit 37/40 durchgeführt, die nur im Kontakt mit Steinsalz injiziert wurden. Im Kontakt mit leichtlöslichen Kalisalzen wurden im Rahmen von veröffentlichten Forschungsvorhaben noch keine Injektionsversuche durchgeführt. Daher ist vor dem Einsatz von NWG 37/40 im Kontakt mit Kalisalzen der Nachweis zu erbringen, dass es durch die Injektion des Natronwasserglas nicht zu Lösungserscheinungen im Salz kommt. Falls dies der Fall ist, besteht die Möglichkeit, durch den Einsatz von wasserärmeren Natronwassergläsern mit einem höheren  $\text{SiO}_2$ -Anteil die Anlösungen zu minimieren. Jedoch weisen die  $\text{SiO}_2$  reicheren Wassergläser eine höhere Viskosität und somit ein schlechteres Eindringverhalten in Wegsamkeiten auf [110].



Kunstharz - Denepox 40:

Im Tiefbau werden zahlreiche unterschiedliche Kunstharze als Injektionsmittel verwendet. Allerdings lassen sich Acryl-Gele sowie Einkomponenten-Polyurethane nicht im Salz einsetzen, da die Polymerisation unter diesen Bedingungen gestört sein kann. Um aus den darüberhinausgehenden verfügbaren Injektionsharzen das geeignetste Injektionsharz für den Einsatz im Salinar zu ermitteln, hat Kaledin[41] umfangreiche Eignungstests und In-Situ Versuche durchgeführt. Resultierend aus den Versuchen wurde das Zweikomponentenharz Denepox 40 der Firma De Neef als geeignetstes Material für Injektionen im Salz ausgewählt.

Denepox 40 besteht aus zwei separat zu lagernden Komponenten. Die Komponente A ist ein Epoxydharz, die Komponente B ein Polyamin Härter. Werden beide Komponenten miteinander im Massenverhältnis 100/30 (Epoxydharz/Härter) vermischt, kommt es zur Aushärtung des Harzes. Denepox 40 ist nach dem Vermischen noch etwa 80 Minuten lang bei 25°C verarbeitbar. Diese Angabe gilt für eine Menge von 100 Gramm. Wenn größere Mengen eingesetzt werden, kommt es durch die beim Aushärteprozess freigesetzte Wärme zu einem verkürzten Abbindeprozess. Nach einer Aushärtezeit von etwa 24 Stunden erreicht das Harz seine Endfestigkeit. Denepox 40 zeichnet sich durch eine niedrige Anfangsviskosität von ca. 85 mPas, hohe Druck- und Zugfestigkeiten sowie hohe Haftzugfestigkeiten auf Betonoberflächen aus. Die zu behandelnde Oberfläche oder zu injizierende Risse müssen frei von Staub, Betonschlamm sowie Ölen und Fetten sein, um eine möglichst gute Anbindung und hohe Haftzugfestigkeiten des Harzes zu erhalten[67].

Das Kunstharz Denepox 40 wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens Carla zur Injektion der Kontaktfuge eines Streckenverschlussbauwerks eingesetzt, wobei die Permeabilität um mehrere Größenordnungen reduziert wurde.

#### **4.4 Beständigkeit von Injektionsmaterialien unter salinaren Bedingungen**

Damit die in den Bereich der Kontaktfuge eingebrachten Injektionsmaterialien über den Zeitraum bis zum wirksamen Einschluss der eingelagerten Abfälle durch die mit Salzgrus versetzten Strecken wirksam sind, ist vor deren Einsatz die Beständigkeit der Injektionsmaterialien für den Funktionszeitraum des Streckenverschlussbauwerks aufzuzeigen. Eine Möglichkeit, die Alterungsbeständigkeit aufzuzeigen sind Vergleiche mit natürlichen Analoga, also Materialien, die den eingesetzten Injektionsmitteln sehr ähnlich sind und natürlicherweise in Salzlagerstätten vorkommen.

Bei der Aushärtung von Wasserglas bilden sich  $\text{SiO}_2$ -Phasen. Es gibt in der Natur eine Reihe von natürlichen  $\text{SiO}_2$ -Phasen wie z.B. Opal oder Quarz, wobei der Opal keine interne Kristallstruktur aufweist und aus hydratisiertem Kieselgel besteht und somit geochemisch nah mit den Silikatgruppen des gelierten Wasserglases verwandt ist. In marinen Evaporitlagerstätten wie z.B. dem Zechsteinsalinar kommen sowohl Opal oder Quarz natürlicherweise vor[66]. Ein weiteres Natürliches Analogon für die Bildung von  $\text{SiO}_2$ -Verbindungen aus Silikatgelen stellen die Cherts (sedimentär entstandene Silikatgesteine) der Sodaseen des ostafrikanischen Grabens dar, die Alter zwischen 300.000 und 780.000 Jahren aufweisen. In diesen Seen kommen neben amorpher Kieselsäure zahlreiche Na-Hydrosilikate vor, die chemisch mit dem Wasserglas verwandt sind und Vorstufen für reine  $\text{SiO}_2$ -Verbindungen sein sollen[53].

Für Kunstharze liegen solche natürlichen Analoga nicht vor, weswegen es nicht möglich ist, den Nachweis der Alterungsbeständigkeit über natürliche Analoga zu erbringen. Die ersten industriell gefertigten, vollständig synthetischen Kunststoffe wurden zu Beginn des 20. Jahrhunderts hergestellt[68]. Nach der Entwicklung von Epoxidharzen in den 1960ern fanden diese schon bald zum Setzen von Klebeankern Einsatz im Bergbau und in den frühen 1960er Jahren wurden im deutschen Steinkohlenbergbau die ersten Polyurethaninjektionen zur Erhöhung der Standfestigkeit des Gebirges durchgeführt[69; 70]. Es ist anzunehmen, dass die gleichen Technologien in kurzem zeitlichen Abstand den Einzug in den Salzbergbau fanden, was bedeutet, dass man die Alterungsbeständigkeit der Kunststoffe im Salinar nur über diesen Zeitraum betrachten kann.

Durch eine Reihe unterschiedlicher Faktoren (Sonnenstrahlung, Radioaktivität, mechanische oder chemische Einwirkungen, Temperatur- oder Feuchtigkeitsschwankungen) kann es im Laufe der Zeit zu einer irreversiblen Veränderung der Struktur und Zusammensetzung von Polymerwerkstoffen kommen[41]. Unter Laborbedingungen ist es möglich, diese Einflussgrößen zu simulieren und somit Aussagen über die Beständigkeit von Kunststoffen zu treffen. Hierbei werden die Probenkörper Zerstörungsfaktoren ausgesetzt, die deutlich größer als unter realitätsnahen Einsatzbedingungen sind, wodurch ein um das 5 bis 25-fache beschleunigtes Altern der Kunststoffe hervorgerufen werden kann[41]. In Untersuchungen mit beschleunigten Altern unter der Einwirkung von Salzlösung bei 7° C konnte für ein Polymerinjektionsmaterial der Firma DeNeef gezeigt werden, dass dieses über einen Zeitraum von 110 Jahren keine Verschlechterung der Eigenschaften erfährt[41].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Informationen über die Stabilität von Epoxidharzen aus dem untertägigen Einsatz lediglich für einen Zeitraum von 50 Jahren vorliegen. Mit Untersuchungen zu beschleunigten Altern von Polymerwerkstoffen lässt sich die Stabilität über einen Zeitraum von 110 Jahren aufzeigen, jedoch ist es derzeit nicht möglich, für längere Zeiträume eine Aussage über die Stabilität von Kunststoffen im Salinar zu treffen.

Für den Injektionsmörtel IM 4+ wird vom Hersteller angegeben, dass dieser langzeitbeständig gegenüber hochkonzentrierten  $MgCl_2$ - bzw.  $MgSO_4$ -Lösungen ist, im Kontakt mit Wasser oder schwach mineralisierten Lösungen jedoch nur bedingt beständig ist[62]. Bei Bauwerken, die aus Magnesiabeton errichtet werden, sind zutretende Lösungen mit einem  $MgCl_2$ -Gehalt von unter 50 g/Kilo  $H_2O$  gegenüber dem Baustoff lösungsfähig. Bei höheren  $MgCl_2$  Konzentrationen ist der Magnesiabeton jedoch langzeitstabil[34].

Salzbeton ist im Kontakt mit NaCl-gesättigten Lösungen stabil, jedoch kommt es im Kontakt mit Mg-reichen Lösungen zum Herauslösen der Calcium-Silikat-Phasen des Zementsteins[59].

Kohlenwasserstoffvorkommen wurden in einer Vielzahl deutscher Salzbergwerke (Beispielsweise: Sigmundshall, Siegfried - Giessen, Asse, und Neuhoof - Ellers) beobachtet, weswegen Sie zum natürlichen Stoffbestand von Salzgesteinen gezählt werden[64]. Daher wird auch Bitumen als ein natürlicherweise in Salzlagerstätten vorkommender Stoff, der im Salzgebirge auch über lange Zeiträume als chemisch stabil anzusehen ist, betrachtet[41]. Jedoch ist aus Ölfeldern der Vorgang der mikrobiellen Degradation bekannt. Zwar herrschen in Ölfeldern andere geochemische Bedingungen als in Salzstöcken, trotzdem soll an dieser Stelle auf die Möglichkeit hingewiesen werden, dass es durch Bakterien zu einem Abbau, beziehungsweise der Veränderung der Zusammensetzung des Bitumens kommen kann. Die Bakterien können sowohl bei aeroben als auch anaeroben Bedingungen leben, wobei die optimalen Bedingungen für die aeroben Bakterien bei Temperaturen zwischen 20° und 50°C

herrschen. Die aeroben Bakterien bevorzugen einen Gehalt von über 8 mg/l gelösten Sauerstoff im Wasser und fast  $\text{H}_2\text{S}$  freies Öl, da dieses für die aeroben Bakterien giftig ist[93].

Von der Nagra wurden Versuche zum Abbau von Asphalt bzw. Bitumenschichten durch Mikroorganismen durchgeführt die zeigen, dass pro Jahr zwischen 20 und 50 g Bitumen pro  $\text{m}^2$  durch Mikroorganismen unter aeroben Bedingungen abgebaut werden können und etwa 0,2 bis 0,5 g Bitumen pro Jahr unter anaeroben Bedingungen abgebaut werden. Diese Untersuchungen zeigen auch, dass die Mikroorganismen bei Temperaturen von  $30^\circ\text{C}$  eine höhere Aktivität als bei  $10^\circ\text{C}$  haben und relativ unempfindlich gegenüber Veränderungen des pH-Werts sind[94]. Untersucht wurden die folgenden Mikroorganismen: *Pseudomonas aeruginosa* sowie zwei unbekannte Arten der Gattung *Streptomyces* und *Alcaligenes*.

Für Wasserglas und 2K-Bitumen lässt sich die Alterungsbeständigkeit der Injektionsmittel im salinaren Milieu über natürliche Analoga über geologische Zeiträume aufzeigen, wobei dies unabhängig von der Mineralogie des Salzes als auch der Zusammensetzungen von gesättigten Lösungen ist. Die beiden hydraulisch abbindenden Baustoffe sind in Ihrer Zusammensetzung und Lösungsbeständigkeit jeweils auf einen Anwendungszweck ausgelegt und weisen somit eine geringere Vielseitigkeit hinsichtlich der geochemischen Milieus für die die Alterungsbeständigkeit im Salinar auf als das 2K-Bitumen und das Wasserglas. Für das Epoxidharz lässt sich über Versuche mit beschleunigten Altern eine Beständigkeit in salinaren Lösungen für einen Zeitraum von mindestens 110 Jahren aufgezeigt, über längere Zeiträume ist dies jedoch nicht möglich. Trotz der Schwierigkeit mit dem Nachweis der Beständigkeit über längere Zeiträume sind die Kunstharze von Bedeutung für die Abdichtung von Streckenverschlussbauwerken, da diese gute rheologische Eigenschaften aufweisen und somit in Wegsamkeiten mit geringen Öffnungsweiten eindringen können. Dies gilt insbesondere zur Abdichtung von Kontaktfugen bei Streckenverschlussbauwerken im Kontakt mit Kalisalzen, da hierfür keine partikelfreien Injektionsmittel zur Verfügung stehen, solange der Nachweis nicht erbracht ist, dass Natronwassergläser auch im Kontakt mit leichtlöslichen Kalisalzen Wegsamkeiten verschließen und die Permeabilität verringern.

Abschließend zur Vorstellung der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Injektionsmaterialien sollen die Einsatzmöglichkeiten der einzelnen Injektionsmaterialien in Kombination mit unterschiedlichen Baustoffen für Streckenverschlussbauwerke und den anstehenden Salzen dargestellt werden. Hierbei wird hinsichtlich der anstehenden Salze zwischen den leichtlöslichen Kalisalzen und Steinsalz unterschieden. Im Kontakt mit Kalisalzen kann nur Sorelbeton zur Errichtung des Streckenverschlussbauwerks eingesetzt werden. Das bedeutet, dass alle Injektionsmaterialien die im Kontakt mit Kalisalzen eingesetzt werden auch mit Sorelbeton kompatibel sein müssen. Zur Errichtung von Streckenverschlussbauwerken im Steinsalz können sowohl Salzbeton als auch Sorelbeton eingesetzt werden. Somit müssen die eingesetzten Injektionsmaterialien entweder mit Steinsalz und Salzbeton oder mit Sorelbeton und Steinsalz kompatibel sein. In Abb. 10 wird eine Übersicht über die Einsatzmöglichkeiten der untersuchten Injektionsmaterialien gegeben.

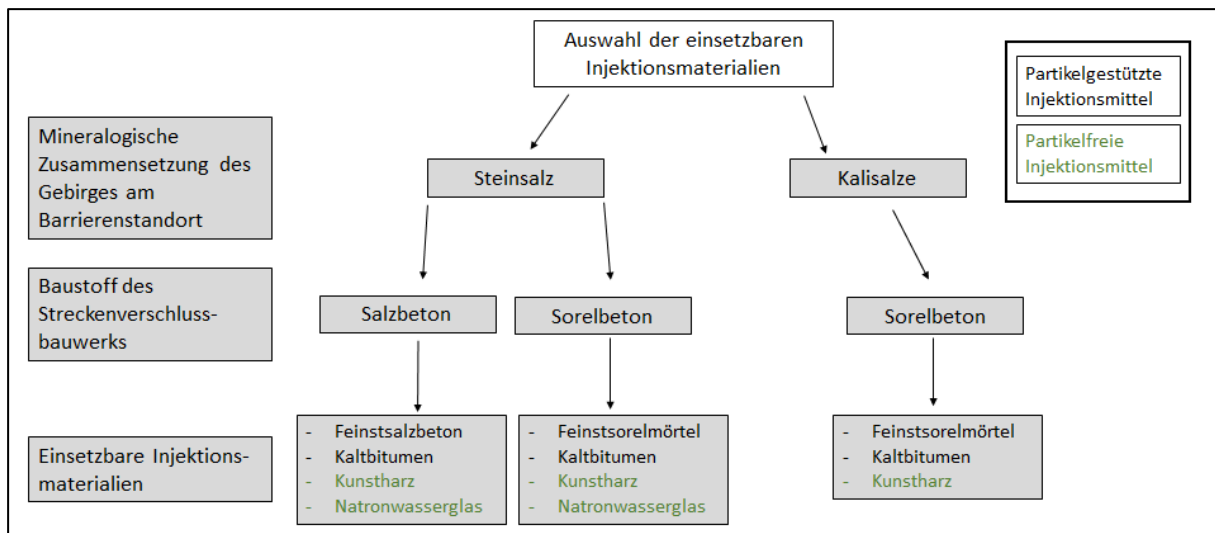


Abb. 10: Fließschema zur Auswahl des geeigneten Injektionsmaterials in Abhängigkeit von der mineralogischen Zusammensetzung des Gebirges am Barrierenstandort sowie dem Baustoff des Streckenverschlussbauwerks.

## **5 Laborative Charakterisierung der rheologischen Eigenschaften ausgewählter Injektionsmaterialien**

Um ein besseres Verständnis für die Fließeigenschaften und das Eindringverhalten der Injektionsmaterialien in Spalten und Risse zu bekommen, wurden eine Reihe von Materialkennwerten der Injektionsmaterialien im Labor erfasst. Die Messungen wurden bei bergbautypischen Temperaturen von 30 und 40°C durchgeführt, da die ermittelten Materialparameter temperaturabhängig sind. Die im Rahmen der Labormessungen ermittelten Materialkennwerte sind:

- Dichte
- Viskosität (Rheometer und Marschtrichter)
- Benetzungswinkel im Kontakt mit Steinsalz
- Oberflächenspannung

Üblicherweise werden zur Beurteilung der rheologischen Eigenschaften der jeweiligen Injektionsmaterialien auf den Produktdatenblättern die Viskosität bei Temperaturen von 20 oder 25°C sowie die Dichte als einzige Suspensionsparameter angegeben. Dies ermöglicht eine erste Einschätzung des Fließverhaltens und somit näherungsweise auch des Eindringverhaltens der Injektionsmaterialien in Wegsamkeiten. Um eine präzisere Beurteilung des Eindringverhaltens durchzuführen muss zusätzlich zur Viskosität noch der Benetzungswinkel zwischen Injektionsmaterial und umgebenden Gestein sowie die Oberflächenspannung des Injektionsmaterials ermittelt werden.

Zusätzlich zu diesen unter Laborbedingungen ermittelbaren rheologischen Kennwerten wird beim Einsatz der Injektionsmaterialien oftmals als Konsistenzprüfverfahren für Baustoffe die Marshtrichterauslaufzeit ermittelt. Dieses Messverfahren ist nicht so präzise wie die vorstehend genannten, und wird neben der Fließfähigkeit des Baustoffes auch durch dessen Dichte beeinflusst. Jedoch stellt die Erfassung der Marshtrichterauslaufzeit ein einfaches Verfahren dar, um vor dem Einsatz der Injektionsmaterialien deren Konsistenz zu prüfen. Somit kann unter Baustellenbedingungen sichergestellt werden, dass die Fließfähigkeit des Injektionsmaterials innerhalb eines vorab unter Laborbedingungen festgelegten Bereiches liegt.

Im Folgenden werden die einzelnen Messverfahren vorgestellt, bevor anschließend auf die Messwerte eingegangen wird.

### **5.1 Aufbau der Messungen**

#### **5.1.1 Viskositätsmessungen**

Die Viskositätsmessungen werden mittels eines Scherrheometers nach dem Platte/Platte Messsystem durchgeführt, wobei die dynamische Viskosität des Injektionsmittels ermittelt wird. Hierbei ist es möglich die Platten zu beheizen, um die Messungen bei unterschiedlichen Temperaturen durchzuführen. Zudem besteht die Möglichkeit, die Viskositätsveränderung über die Zeit zu erfassen. Mithilfe der Abhängigkeit zwischen Viskosität und Zeit lässt sich die optimale Verarbeitungszeit des jeweiligen Injektionsmittels ermitteln.

Die Scherkräfte, die im Baustoff auftreten haben zu unterschiedlichen Zeiten sehr unterschiedliche Werte. Während des Anmischvorgangs des Baustoffes können Schergeschwindigkeiten in der

Größenordnung von  $1000 \text{ s}^{-1}$  auftreten. Während der Lagerung des Baustoffes zwischen dem Anmischen und dem Verpressen treten sehr geringe Schergeschwindigkeiten von unter  $1 \text{ s}^{-1}$  auf.

Für Blut in Kapillaren werden in der Literatur Schergeschwindigkeiten zwischen  $0,1$  und  $100 \text{ s}^{-1}$  angegeben[71]. Der Durchmesser von Blutkapillaren liegt im Mittel bei  $8 \text{ }\mu\text{m}$ [72]. Bei Injektionen in der Medizin kommen üblicherweise Nadeln mit einem Innendurchmesser von einigen hundert  $\mu\text{m}$  zum Einsatz. Für medizinische Injektionen wird eine Schergeschwindigkeit von  $1000$  bis  $10000 \text{ s}^{-1}$  angegeben[71]. Da die Öffnungsweite der zu injizierenden Kontaktfuge zwischen der Öffnungsweite der Blutkapillaren und der Injektionsnadeln liegt, wurde eine Schergeschwindigkeit von  $100 \text{ s}^{-1}$  für die in dieser Arbeit durchgeführten Viskositätsmessungen ausgewählt.

Bei der Platte/Platte Messmethode wird die zu messende Flüssigkeit zwischen zwei Platten gegeben und anschließend wird die obere Platte in Rotation versetzt. Über die Messung des Abstands der Platten zueinander und der Drehzahl der oberen Platte können die Schergeschwindigkeit (Gleichung 1) sowie die Schubspannung (Gleichung 2) errechnet werden. Wenn sowohl die Scherrate als auch die Schubspannung bekannt sind, kann auch die Viskosität der Flüssigkeit im Messspalt bestimmt werden (Abb. 11). Die Messungen erfolgten mit dem Rheometer AR 500/1000 der Firma TA Instruments.

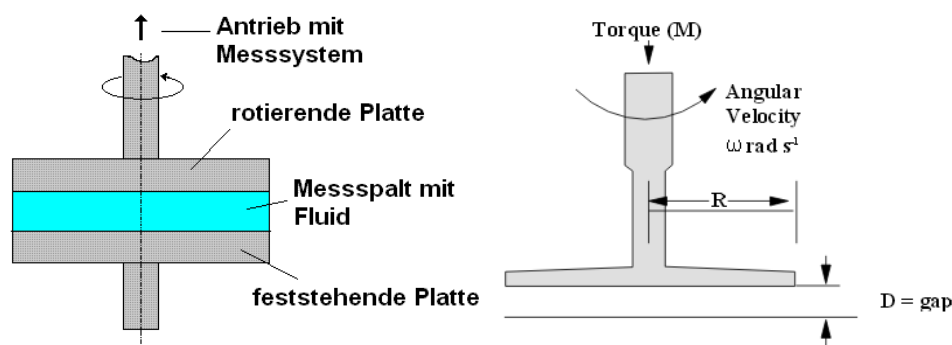


Abb. 11: Platte-Platte Rheometer[73; 74]

$$\text{Schergeschwindigkeit} = \frac{R}{D} \times \omega \quad (1)[75]$$

$$\text{Schubspannung} = \frac{2}{\pi \times R^3} \times T \quad (2)[75]$$

Die Bestimmung der Viskosität mittels Platte-Platte Verfahren gelingt nicht mit allen Injektionsmitteln. Für Ultrafin 12 und Wasserglas ist diese Methode nicht geeignet. Der Messspalt hat eine Höhe von  $300 \text{ }\mu\text{m}$  und wie in Abb. 11 dargestellt kommt das Fluid im Messspalt seitlich in Kontakt mit der Umgebungsluft. Der Kontakt mit der Umgebungsluft führt während der Messung dazu, dass das Wasserglas seitlich aushärtet. Dieser Effekt kann entweder auf die Aushärtereaktion des Wasserglases im Kontakt mit dem  $\text{CO}_2$  der Luft oder durch eine Verdunstung des im Wasserglas enthaltenen Wassers zurückzuführen sein. Dies führt dazu, dass sich zuerst eine feste Haut auf dem Wasserglas bildet. Anschließend kommt es zur Bildung von Klümpchen, die durch Verhaken/Verkanten einen Widerstand zwischen den beiden Platten erzeugen. Somit wird aufgrund des Widerstandes eine Viskosität gemessen, die über der des Fluides liegt.

Auch bei den Messungen mit Ultrafin 12 kam es zu Problemen. Der wässrige Anteil der Suspension trat aus dem Messspalt aus, wodurch es in der zurückbleibenden Suspension mit einem erhöhten Feststoffanteil zu Verklumpungen kam.

Bei den Messungen mit dem 2K-Bitumen führte die Korngröße der Hartbitumenstücke von teilweise über 300  $\mu\text{m}$  zu Problemen. Der geplante Abstand der Platten des Rheometers von 100  $\mu\text{m}$  ließ sich aufgrund der Korngröße des Hartbitumens nicht einstellen.



Abb. 12: Links: Rheometer Haake Mars III der Firma Thermo Scientific. Rechts: Detailaufnahme der Temperiereinheit sowie des Probenbechers und des Titandrehkörpers.

In Abb. 12 ist das zur Messung der Viskosität eingesetzte Rheometer dargestellt. Dieses hat einen zylindrischen Probenbecher mit einer ebenen Grundfläche und einen Durchmesser von 27,207 mm. Pro Messung wird der Becher mit 16 ml des zu untersuchenden Baustoffes befüllt. Der Rotationskörper, der in den mit Baustoff gefüllten Becher abgesenkt wird, besteht aus Titan. Er hat einen Durchmesser von 25,079 mm und am unteren Ende einen Konuswinkel von  $120^\circ$ . Zwischen der Spitze des Konus und dem Boden des Probenbechers ist ein Abstand von 5,3 mm. Seitlich besteht zwischen Drehkörper und Becher ein Spalt von 1,064 mm.

### 5.1.2 Rheologie – Marshtrichter

Eine einfache Methode, mit der sich die Fließfähigkeit von Baustoffen ermitteln lässt, ist der Marshtrichter. Der Marshtrichter ist ein Kunststofftrichter mit einem Fassungsvermögen von 1,5 Litern, der am unteren Ende eine Auslaufdüse mit einem Durchmesser von 8 mm hat. Für die Messung wird der Trichter schwingungsfrei ca. 150 mm über dem Auffangbehälter befestigt. Der Auffangbehälter muss eine Markierung bei 1000 ml Füllvolumen aufweisen. Nähere Informationen zum Aufbau und der Durchführung des Konsistenzprüfungsverfahrens für Baustoffe mittels Marshtrichter sind in DIN 4127 gegeben[76].

Die Marshtrichter-Viskosität bzw. Trichterauslaufzeit ist das Verhältnis der Geschwindigkeit, mit der die Probenflüssigkeit durch die Auslaufdüse austritt, zu der Kraft, mit der die Flüssigkeit durch die Auslaufdüse drückt. Sie wird gemessen in Sekunden, die 1000  $\text{cm}^3$  Probenflüssigkeit benötigt, um aus dem Marshtrichter durch die Auslaufdüse zu fließen. Häufig wird auch die Zeit bis zum vollständigen Ausfließen des Prüfmediums gemessen. Auf die zuletzt genannte Untersuchung wurde jedoch im Rahmen des durchgeführten Arbeitsprogramms verzichtet[77].

### 5.1.3 Dichtemessungen

Für die Dichtemessungen steht das Dichtebestimmungsset YDK 01 der Firma Sartorius zur Verfügung (Abb. 13), welches auf einer Präzisionswaage montiert wird. Bei der Dichtebestimmung mit dieser Apparatur wird das „Archimedische Prinzip“ verwendet. Das heißt, dass ein Körper beim Eintauchen in eine Flüssigkeit eine nach oben gerichtete Auftriebskraft erfährt, die den gleichen Betrag besitzt, wie die Gewichtskraft des verdrängten Flüssigkeitsvolumens. Wenn die Dichte des Glassenkkörpers, der in die zu untersuchende Flüssigkeit getaucht wird, bekannt ist, dann lässt sich mit Hilfe einer hydrostatischen Waage durch wägen des Glassenkkörpers an Luft und in der zu untersuchenden Flüssigkeit die Dichte der Flüssigkeit ermitteln (Gleichung 3).

Zur Dichtebestimmung von Flüssigkeiten werden diese in einem kleinen Becherglas auf die Waage gestellt. Durch das Befestigen eines Thermometers am Rand des Becherglases lässt sich die Temperatur bei der Dichtemessung erfassen.

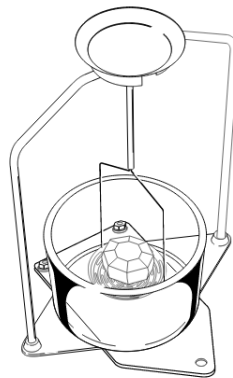


Abb. 13: Dichtebestimmungsset YDK 01 der Firma Sartorius[78]

$$\rho = \frac{A}{A-B} * \rho_f \quad (3)[78]$$

$\rho$  = Dichte des Glassenkkörpers[g/cm<sup>3</sup>]

$\rho_f$ = Dichtewert der zu untersuchenden Flüssigkeit [g/cm<sup>3</sup>]

A= Gewicht des Glassenkkörpers in der Luft [g]

B= Gewicht des Glassenkkörpers in der zu untersuchenden Flüssigkeit [g]

### 5.1.4 Grenzflächenspannung

Als Grenzflächenspannung werden die Kräfte bezeichnet, die an der Grenze zwischen zwei verschiedenen Phasen auftreten. Die Grenzflächenspannung kann sowohl zwischen zwei nicht mischbaren Flüssigkeiten als auch zwischen einer Flüssigkeit und einer Gasphase gemessen werden. Die Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeiten und Gasen wird auch als Oberflächenspannung bezeichnet.



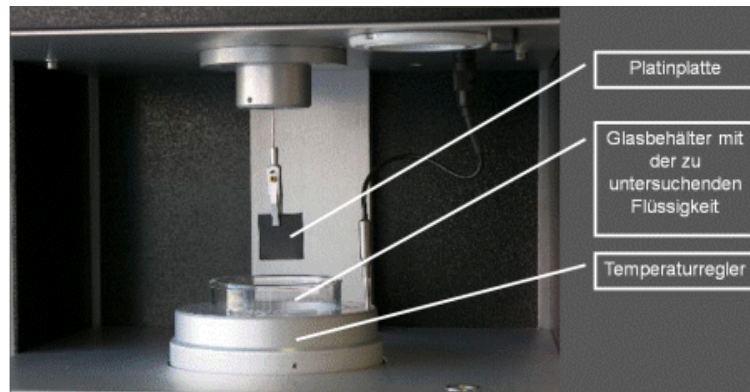


Abb. 14: Aufbau einer Wilhelmy-Waage

Die Messung der Oberflächenspannung zwischen einer Flüssigkeit und der Umgebungsluft erfolgt mit einer Wilhelmy-Waage (Abb. 14). Hierbei wird ein an der Oberfläche aufgerautes Platinplättchen, das an einer Federwaage aufgehängt ist, in die zu untersuchende Flüssigkeit getaucht. Aufgrund der Rauigkeit der Oberfläche des Platinplättchens wird dieses durch die Flüssigkeit benetzt (Abb. 15). Als Folge der Benetzung steigt die Flüssigkeit an der Wilhelmy-Platte empor, wodurch das benetzte Platinplättchen in die Flüssigkeit gezogen wird. An der Federwaage wird die Kraft gemessen, die notwendig ist, um die Wilhelmy-Platte in der ursprünglichen Lage zu halten.

Mit der folgenden Gleichung lässt sich die Grenzflächenspannung berechnen:

$$\sigma = \frac{P}{2 \cdot (a+b)} \quad (4)$$

$\sigma$  = Grenzflächenspannung [mN/mm]

P = Kraft, die benötigt wird, um das Plättchen in der ursprünglichen Lage zu halten [N]

a = Breite des Platinplättchens [mm] (Das verwendete Plättchen hat eine Länge von 10 mm bei einer Breite von 19,9 mm und einer Dicke von 0,2 mm)

b = Länge des Platinplättchens [mm]

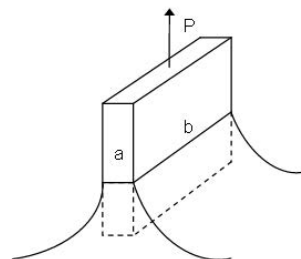


Abb. 15: Links: Benetzte Wilhelmy-Platte. Rechts: Wilhelmy-Platte der Länge b und Breite a die mit der Kraft P in der ursprünglichen Lage gehalten wird.

### 5.1.5 Kontaktwinkel

Die Kontaktwinkelmessungen werden nach der Methode des liegenden Tropfens durchgeführt. Hierbei wird die zu untersuchende Flüssigkeit auf eine Oberfläche gegeben und der Winkel, der sich im Dreiphasen Kontakt zwischen Flüssigkeit, Feststoff und Gasphase bildet, wird per Kamera erfasst. Die Aufnahme wird anschließend am PC graphisch ausgewertet.

Die Versuche wurden an einem Kontaktwinkelmessgerät des Typs OCA 15 durchgeführt. Dieses verfügt über eine S/W Kamera, welche ein Bild von 575 nutzbaren Zeilen liefert. Die Probe wird von der Rückseite her beleuchtet, wobei die Intensität den Gegebenheiten angepasst werden kann. Da die Messreihen bei Temperaturen von 30°C und 40°C durchgeführt werden sollten, kam darüber hinaus eine Wärmekammer zum Einsatz. Diese verfügt über ein Thermoelement sowie zwei Glasfenster. Der Aufbau der Messapparatur ohne Wärmekammer ist in Abb. 16 dargestellt.



Abb. 16: Kontaktwinkelmessgerät des Typs OCA 15.

### 5.2 Durchführung von Messungen zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften ausgewählter Injektionsmaterialien

Vor den Messungen wurde die jeweils benötigte Menge an Injektionsmittel angemischt. Je nach Messung waren dies zwischen 75 und 200 Gramm. Für jede Messung wurde eine frische Charge Injektionsmittel hergestellt und nach dem gleichen Verfahren angemischt. Die Einzelkomponenten wurden nach dem Abwiegen für 3 Minuten mit hoher Frequenz mit einem Milchaufschäumer gemischt. Die Zeit zwischen Anmischen des Injektionsmittels und dem Beginn des Versuchs wurde so kurz wie möglich gehalten, sie variiert aber von Versuch zu Versuch zwischen ein und vier Minuten.

Bei den Suspensionen wurden die Feststoffe unter langsamen Rühren zur Flüssigkeit hinzugegeben bevor anschließend mit dem Milchaufschäumer beide Materialien intensiv vermischt wurden. Die

Abwägung der Komponenten erfolgte mit der Feinwaage BP 310 S der Firma Sartorius, die eine Genauigkeit von 0,001 Gramm hat.

### **5.2.1 Viskositätsbestimmung**

Bei der Viskositätsbestimmung mittels Platte-Platte Verfahren wurden 3 ml des Injektionsmittels nachdem dieses angemischt wurde, mit einer Pipette auf die untere Platte des Rheometers gegeben. Durch anschließendes Herunterfahren bei gleichzeitigem Drehen der oberen Platte auf den Plattenabstand von 100  $\mu\text{m}$  verteilte sich das Injektionsmittel im Messspalt. Falls der Messspalt nicht vollständig mit dem Injektionsmittel gefüllt war, wurde die obere Platte nach oben gefahren und unter der Zugabe von etwas Injektionsmittel wurde der Vorgang wiederholt. Sobald der Messspalt vollständig mit Injektionsmittel gefüllt war konnte die Messung beginnen. Vom Anmischen des Injektionsmittels bis zum Beginn der Messung vergingen 2 bis 4 Minuten. Während des Befüllens des Messspalts sowie während der Messung wurde die untere Platte auf die geforderte Temperatur (30 oder 40°C) erwärmt. Um sicherzustellen, dass das Injektionsmittel bei Beginn der Messung die geforderte Temperatur hatte, wurde das Injektionsmittel nach dem Befüllen eine Minute erwärmt, bevor die Viskositätsmessung gestartet wurde.

Für die Messungen mit dem Rotationsviskosimeter werden 16 ml des angemischten Injektionsmittels in den Becher des Rheometers gefüllt. Anschließend wurde der Becher ins Rheometer eingebaut und der Drehkörper in das Injektionsmittel getaucht, sodass dieser auf der Oberseite vollständig bedeckt war. Nun wurde der Drehkörper in Rotation versetzt und nach einer einminütigen Homogenisierungs- und Erwärmungsphase wurde mit der Messung begonnen. Zwischen dem Anmischen des Injektionsmittels und dem Beginn der Messung vergingen etwa drei bis vier Minuten. Üblicherweise werden bei Viskositätsmessungen mit dem Rotationsrheometer eine Messung sowie eine Wiederholungsmessung durchgeführt, was als repräsentativ eingeschätzt wird. Für die Viskositätsbestimmung wurden jeweils Haupt- sowie zwei Wiederholungsmessungen durchgeführt.

### **5.2.2 Rheologie – Marshtrichter**

Vor Beginn der Messung wurde sichergestellt, dass sowohl der Marshtrichter als auch der Auffangbehälter trocken und frei von Suspensionsresten sind, da nur so vergleichbare Auslaufzeiten gemessen werden konnten. Anschließend wurden 1,5 Liter des zu untersuchenden Injektionsmittels in den Marshtrichter gefüllt, wobei die Auslaufdüse verschlossen wurde. Nachdem der Trichter befüllt war wurde die Auslaufdüse geöffnet und die Zeit ermittelt, die während des Auslaufens der 1000 ml des Injektionsmittels in den Auffangbehälter verging. Die Messungen wurden in einem auf die geforderten Werte von 30 und 40° C beheizten Raum durchgeführt. Die Ausgangsstoffe für die anzumischenden Injektionsmittel wurden zum Erwärmen über Nacht im Raum gelagert. Eine Überwachung der Temperatur der Injektionsmittel während der Messungen wurde nicht durchgeführt. Aufgrund der ausreichend langen Aufenthaltszeit im beheizten Raum wird von einer zur Lufttemperatur äquivalenten Baustofftemperatur ausgegangen. Mit einer angemischten Charge Injektionsmittel wurden jeweils zwei Messungen mit zwei separaten Versuchsaufbauten nacheinander durchgeführt. Zwischen den Messungen lag ein zeitlicher Abstand von einer Minute.

### 5.2.3 Dichtemessung

Das Injektionsmittel wurde während des Anmischens auf einer Heizplatte auf 30 bzw. 40° C erwärmt, wobei der Temperaturverlauf mit einem Thermometer permanent überwacht wurde. Das Wasserglas wurde unter ständigem Rühren ebenfalls auf der Heizplatte auf die geforderte Temperatur erwärmt. Zudem wurden der Glaskörper und das Becherglas, in dem die Messung stattfand, aufgewärmt. Während der Dichtemessung wurde die Temperatur mit Hilfe eines am Becherglas befestigten Thermometers erfasst. Üblicherweise vergingen zwischen dem Anmischen des Injektionsmittels und der Dichtebestimmung 60 bis 90 Sekunden.

### 5.2.4 Grenzflächenspannung

Nach dem Anmischen wurde das Injektionsmittel in den Probenhalter gegeben und die erste Messung erfolgte 8 Minuten nach der Herstellung des Injektionsmittels. Der Probenhalter der Wilhelmy-Waage ist beheizbar und wurde zum Erwärmen der Probe auf die geforderten 30 bzw. 40° C temperiert. Zu Beginn der Messung wurde der mit Injektionsmittel gefüllte Probenhalter soweit nach oben verfahren, bis das Platinplättchen in das Injektionsmittel eintaucht. Beim Eintauchen wurde die auf das Platinplättchen ausgeübte Auftriebskraft gemessen. Sobald diese 8,0 mg überschritten hatte wurde die Höhe des Probenhalters als Nulllinie definiert. Anschließend wurde das Platinplättchen 3 mm tief in das Injektionsmittel getaucht und wieder um 3 mm herausgezogen. Danach folgte die eigentliche Messung. Durch das Eintauchen des Plättchens in das Injektionsmittel wurde dieses benetzt. Die benetzende Flüssigkeit übt eine Gewichtskraft auf das Plättchen aus, die gemessen werden konnte und aus der die Oberflächenspannung berechnet wurde.

Für alle Injektionsmittel, mit Ausnahme des Wasserglases, erfolgten die Messungen 8, 16, 24 und 32 Minuten nach dem Anmischen. Zwischen den einzelnen Messungen musste das Platinplättchen gereinigt und getrocknet werden, wodurch sich der zeitliche Abstand von 8 Minuten zwischen den einzelnen Messungen begründet. Beim Wasserglas war nur eine Messung innerhalb von 3 Minuten nach der Entnahme der Probe aus dem Vorratsgefäß möglich. Zu späteren Zeitpunkten kam es durch die einsetzende Vergelung des Wasserglases zur Ausbildung einer dünnen Haut auf der Probenoberfläche, sodass weitere Messungen nicht durchgeführt werden konnten.

### 5.2.5 Kontaktwinkel

Für die Kontaktwinkelmessungen sollte eine Oberfläche ausgewählt werden, die repräsentativ ist für Oberflächen mit denen das Injektionsmittel bei der Injektion eines Streckenverschlussbauwerkes in Kontakt kommt. Hierbei wurde angenommen, dass mindestens eine Wandfläche der Kontaktfuge das anstehende Steinsalz der Streckenkontur ist und auch Wegsamkeiten der Auflockerungszone, in die das Injektionsmittel eindringen kann, aus Salz bestehen. Daher wurden die Kontaktwinkelmessungen auf Steinsalz durchgeführt.

Es gibt im Wesentlichen zwei verschiedene Oberflächenformen, die natürlicherweise im Salz der Streckenkontur vorkommen. Bedingt durch die Auffahrung der Strecke und des Nachschnitts der Streckenkontur mittels einer Teilschnittmaschine werden Scherkräfte auf das Gestein ausgeübt. Hierdurch kommt es zum Herauslösen einzelner Mineralkörner aus dem Gesteinsverbund (selten) oder zum Zerschneiden der einzelnen Steinsalzkristalle. Wenn die Halitkristalle zerbrechen, kann dies entweder parallel zu den kristallographischen Flächen geschehen, wobei Steinsalz eine vollkommene

Spaltbarkeit aufweist und sich glatte Spaltflächen bilden. Oder, wenn der Bruch nicht entlang einer der kristallographischen Spaltflächen verläuft, weist Halit einen muscheligen Bruch auf. In Vorversuchen wurden diese beiden Oberflächen hinsichtlich Ihrer Kontaktwinkel verglichen, wobei allerdings kein Unterschied feststellbar war.

Zudem wurde versucht, Probenkörper aus feinem (kleiner 125  $\mu\text{m}$ ) gepresstem Steinsalzpulver herzustellen, um die große Oberfläche zu simulieren, mit der die Injektionsmittel innerhalb eines Risses in Kontakt kommen. Die Presstabletten wurden 3 Minuten lang bei einem Druck von 40 MPa gepresst. Auch auf den aus Salzpulver hergestellten Presstabletten wurden Kontaktwinkelmessungen durchgeführt. Das Ergebnis war nicht verschieden von dem der zerbrochenen Salzkristalle.

Versuchstechnisch waren die entlang der kristallographischen Spaltflächen vollkommen gespaltenen Salzkristalle am einfachsten zu handhaben, da diese sehr plane, parallele Oberflächen aufwiesen. Dadurch eigneten sie sich bestens für die Messmethode des liegenden Tropfens, bei der der Kontaktwinkel zwischen Injektionsmittel und Salz mittels Kamera erfasst wird.

Nach dem Anmischen wurden die Injektionsmittel für die Versuche in einer Einwegspritze aufgesogen, welche anschließend in das Kontaktwinkelmessgerät eingebaut und an die Dosiervorrichtung angeschlossen wurde. Mit der Dosiervorrichtung wurde ein Tropfen von 2,5  $\mu\text{l}$  durch die Kanüle der Spritze herausgedrückt. Dieser Tropfen hing anschließend an der Kanüle und durch Hochfahren des Tisches mit der Salzprobe gelangte der Tropfen auf die Probenoberfläche. Sobald der Tropfen auf der Probenoberfläche aufgebracht war wurde der Probenstisch soweit nach unten gefahren, dass sich der Tropfen vollständig von der Kanüle löste. Der nun auf der Probenoberfläche in Ruhe liegende Tropfen wurde von der Seite mit einer Kamera gefilmt. Anschließend wurde der Kontaktwinkel aus der Videoaufnahme bestimmt.

Die Versuche wurden mit Ausnahme des Wasserglases jeweils in Gruppen zu 6 Einzelversuchen bei je zwei Temperaturstufen durchgeführt. Die gewählten Temperaturen betrugen 30° C und 40° C. Beim Wasserglas wurden aufgrund der schwierigeren Handhabung 17 bzw. 10 Versuche pro Temperaturstufe durchgeführt.

## 5.3 Rheologische Eigenschaften ausgewählter Injektionsmaterialien – Messergebnisse und Interpretation

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Viskositätsmessungen vorgestellt. Die Durchschnittswerte der Einzelmessungen werden in diesem Kapitel vorgestellt und diskutiert. Die Kurvenverläufe der Einzelmessungen, aus denen die Durchschnittswerte gebildet wurden, sind im Anhang abgebildet.

### 5.3.1 Viskositätsbestimmung

#### IM 4+

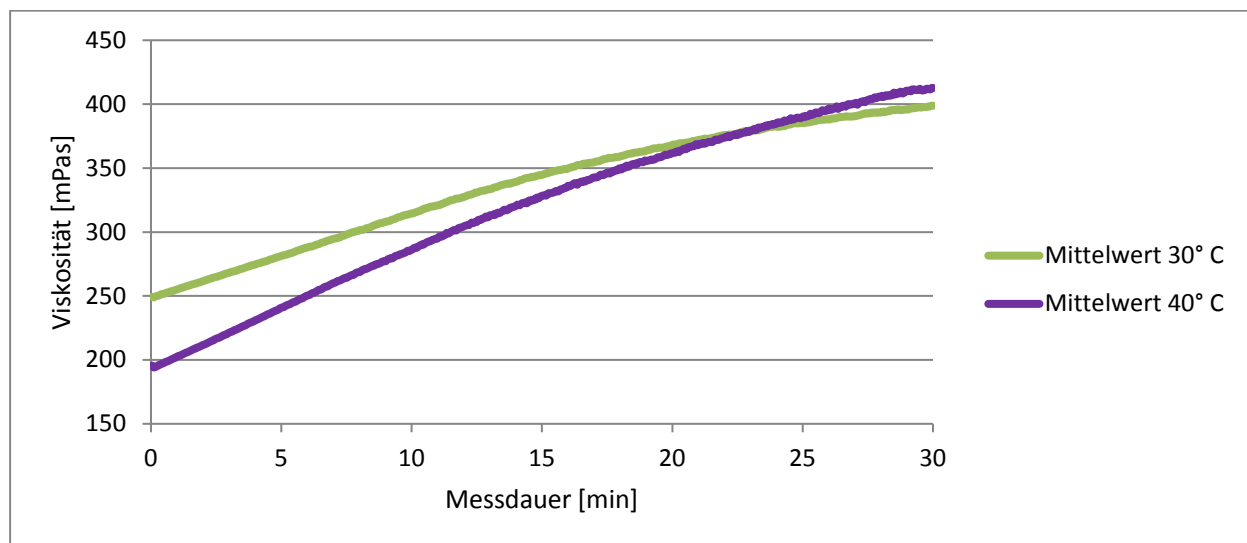


Abb. 17: Mittelwerte der Viskositätsmessungen mit IM 4+ bei 30 und 40° C.

Die für den Feinstorelmörtel IM 4+ gemessene Viskosität ist in Abb. 17 dargestellt. Bei 30°C steigt die Viskosität der Suspension während der dreißigminütigen Messung von anfangs 249 mPas auf 399 mPas zum Ende der Messung. In der zweiten Hälfte der Messung nimmt die Zunahme der Viskosität pro Zeiteinheit (Viskositätsrate) ab. Bei der Messung bei 40° C ist die Viskosität zu Beginn der Messung mit 194 mPas deutlich niedriger und steigt auf 413 mPas an. Auch hier lässt sich im letzten Drittel der Messung eine Abnahme der Viskositätsrate erkennen. Nach knapp 23 Minuten weist die Suspension bei beiden Temperaturstufen die gleiche Viskosität auf, im weiteren Verlauf hat die Suspension bei 40° C eine höhere Viskosität.

Wie bei den meisten Fluiden sinkt die Anfangsviskosität des IM 4+ bei höherer Temperatur. Infolge einer höheren chemischen Reaktivität bei höheren Temperaturen kommt es auch zu einem schnelleren Ansteifen des Baustoffes. Wenn man die Definition der einzelnen Abschnitte des Aushärteverhaltens von Beton in Abb. 18 zur Interpretation der gemessenen Viskositätsverläufe heranzieht, zeigt das IM 4+ ein frühes Ansteifen. Hierbei verlangsamt sich die Zunahme der Viskosität über die Zeit bis die Erstarrung des Injektionsmittels einsetzt und die Viskosität in kurzer Zeit deutlich ansteigt (Abb. 18).

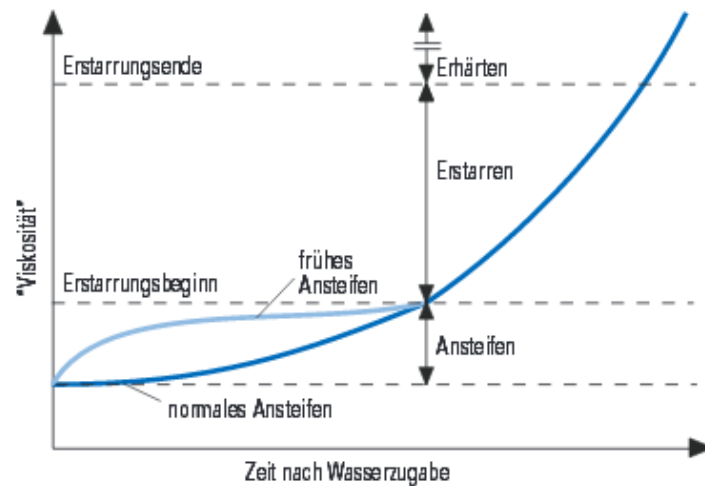


Abb. 18: Definition von Ansteifen, Erstarren und Erhärten von Zement und Beton[79]

### Ultrafin 12

Beim Feinstzement Ultrafin 12 kamen für die Viskositätsmessungen zwei verschiedene Rezepturen zum Einsatz. Bei der ersten Rezeptur mit einem W/Z-Wert von 1,4 wurde Leitungswasser als Anmachlösung verwendet, bei der zweiten Rezeptur wurde eine 90% NaCl-gesättigte Lösung verwendet. Die Mengenanteile von Wasser und Zement wurden vor dem Anmischen abgewogen. Da die Salzlösung eine höhere Dichte aufweist, wurde beim Abwiegen eine Korrektur vorgenommen, sodass beide Suspensionen volumenmäßig mit derselben Flüssigkeitsmenge angemischt wurden.

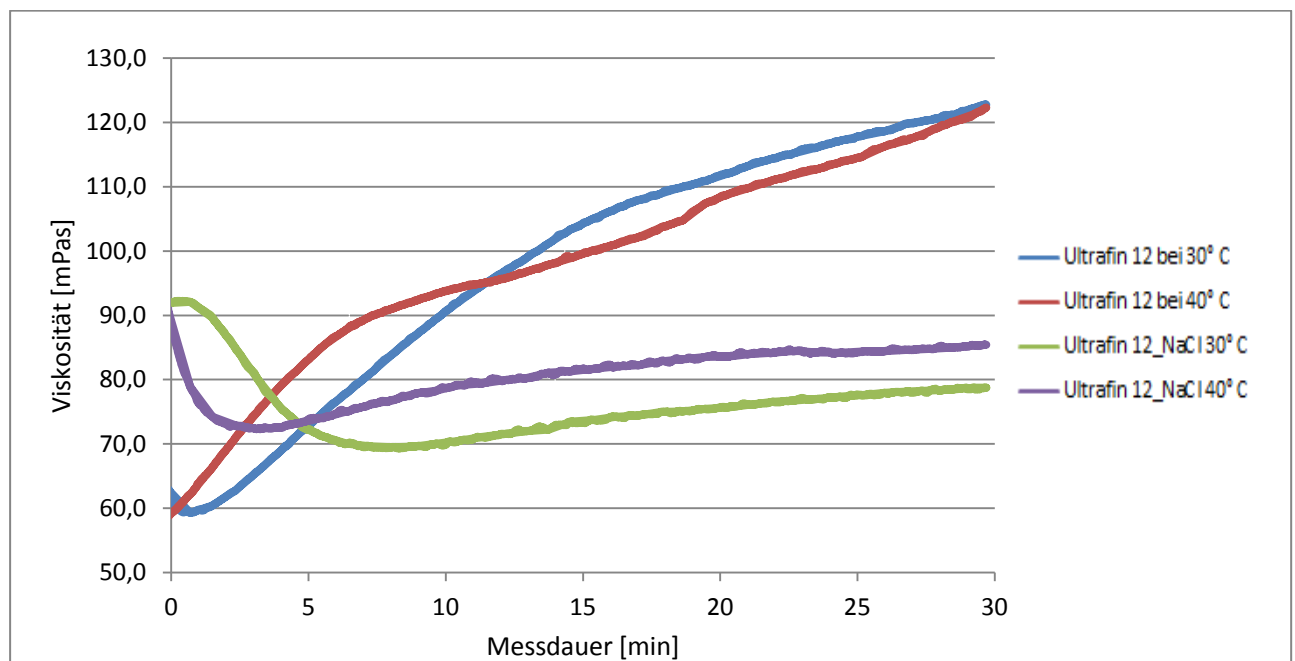


Abb. 19: Mittelwerte der Viskositätsmessungen mit Ultrafin 12 bei 30 und 40° C. Die grüne als auch die violette Kurve dokumentieren die Mittelwerte der Messungen der mit NaCl-haltiger Lösung angemischten Suspension dar.

Beide Kennlinien der Messungen der mit Leitungswasser angemischten Suspension können in mehrere Abschnitte unterteilt werden (Siehe Abb. 19). Die Messung bei 40° C hat eine Anfangsviskosität von etwa 60 mPas. Sie steigt in den ersten sieben Minuten auf etwa 90 mPas an, anschließend nimmt die

Viskositätsrate ab und erreicht nach 30 Minuten eine Viskosität von etwas über 120 mPas. Bei der Messung bei 30°C sinkt die Viskosität um ca. 3 mPas in den ersten 30 Sekunden, um anschließend für zwei Minuten einen horizontalen Verlauf bei 60 mPas aufzuweisen. Der weitere Verlauf ist durch einen Anstieg der Viskosität ausgezeichnet, der innerhalb der ersten 15 Minuten steiler verläuft als innerhalb des nachfolgenden Versuchszeitraums. Die Viskosität dieser Messung ist nach 30 Minuten mit etwas über 120 mPas identisch mit der Messung bei 40° C.

Die Viskositätsentwicklung der Messungen der mit Salzlösung angemischten Suspension von Ultrafin 12 weisen einen interessanten Verlauf auf. Bei beiden Temperaturstufen sinkt die Viskosität im ersten Drittel der Messung und steigt anschließend wieder langsam an ohne die Anfangswerte zu erreichen, die bei 92 und 89 mPas liegen (30° und 40° C). Das Minimum der Viskosität ist bei der Messung bei 30° C nach knapp vier Minuten erreicht, bei der Messung bei 40° C nach ca. siebeneinhalb bis acht Minuten. Die Viskosität erreicht nach 30 Minuten (Messende) bei der Probe mit 40° C einen Wert von 86 mPas, sie liegt über der Viskosität von 79 mPas bei der Probe mit 30° C. Möglicherweise ist der langsame Anstieg der mit Salzlösung angemischten Suspension auf die verringerte Wasseraktivität von NaCl-Lösungen zurückzuführen, die die Reaktion von Zement verzögert[80].

Die mit Salzlösung angemischte Suspension wies eine ausgeprägte Thixotropie auf. Nach einer zehnmütigen Ruhephase war es möglich, ein 250 ml Becherglas mit der Suspension auf den Kopf zu stellen, ohne dass die Suspension herausfließt. Allerdings war eine Anregungsphase von wenigen Sekunden ausreichend um die Suspension wieder in einen fließfähigen Zustand zu überführen. Thixotrope Flüssigkeiten können eine merkliche Einstellzeit der Viskosität aufweisen[81]. Auf diesen Effekt, der durch die Anfahrschubspannung verursacht wird, ist vermutlich das Sinken der gemessenen Viskosität in den ersten Minuten zurückzuführen.

## **2K-Bitumen**

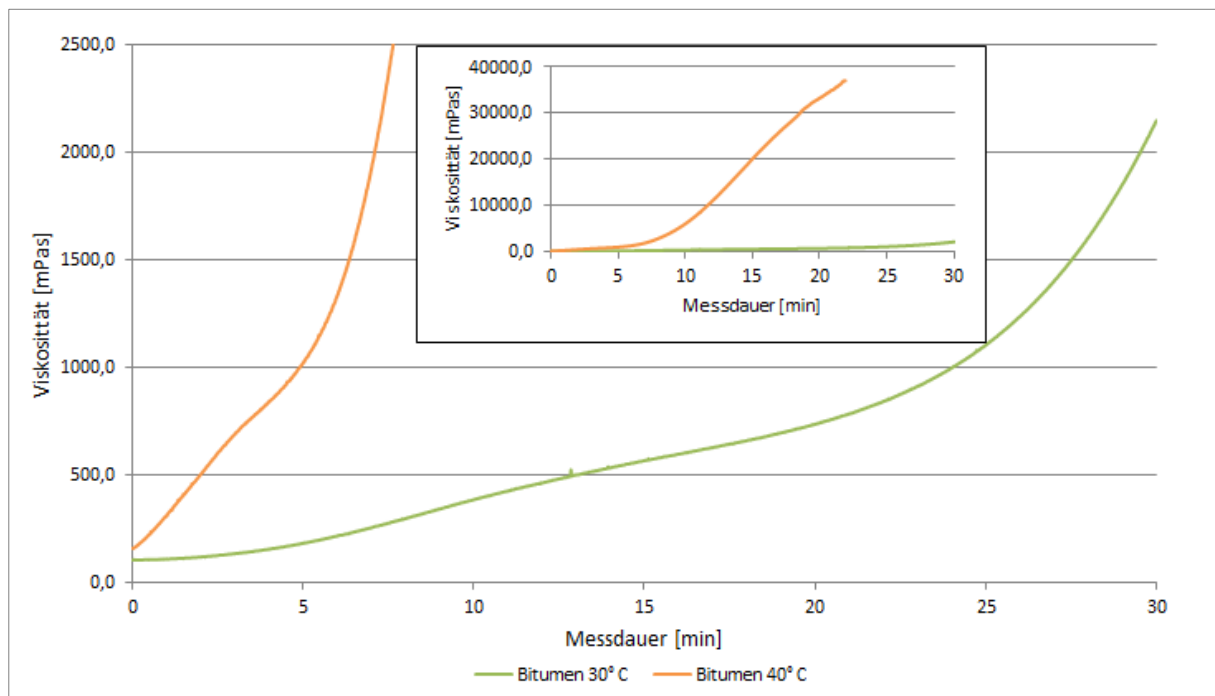


Abb. 20: Mittelwerte der Viskositätsmessungen mit dem 2K-Bitumen bei 30 und 40° C.



Mit dem 2K-Bitumen wurden 4 Messungen durchgeführt, davon entfallen drei Messungen auf die Temperaturstufe 30° C, eine Messung wurde bei 40° C durchgeführt. Es wurde nur eine Messung durchgeführt, da die mit dem 2K-Bitumen hergestellte Suspension 12 Minuten nach Beginn der Messung eine Viskosität von 10.000 mPas aufwies und nach 22 Minuten die Viskosität über 37.000 mPas betrug, was einen Einsatz für Injektionszwecke fraglich erscheinen lässt (Vgl. Abb. 20).

Bei 30° C weist das 2K-Bitumen eine zweigeteilte Kennlinie auf. Während der ersten 20 Minuten der Messung weist die Viskosität einen schwachen und relativ gleichmäßig verlaufenden Anstieg von 110 auf 800 mPas auf. Während der letzten 10 Minuten der Messung steift das 2K-Bitumen zunehmend an, wobei nach einer Messdauer von 30 Minuten eine Viskosität von 2150 mPas erreicht wird.

### Wasserglas

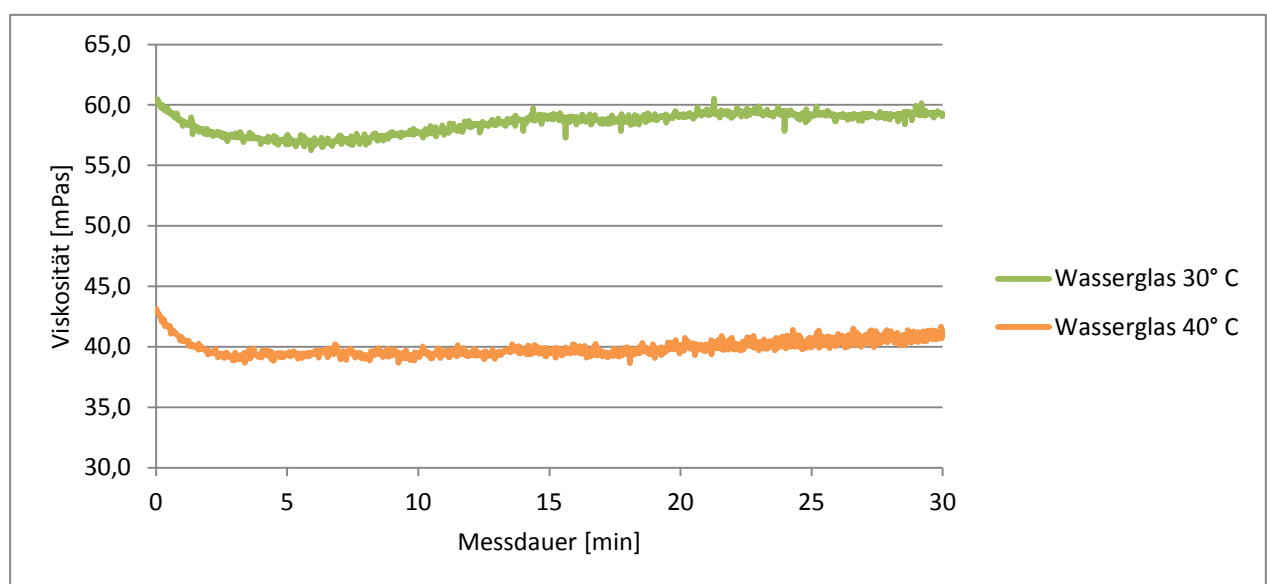


Abb. 21: Mittelwerte der Viskositätsmessungen mit Wasserglas der Grädigkeit 37/40 bei 30 und 40° C.

Die Kurvenverläufe der Viskositätsmessungen des Wasserglases weisen bei beiden Temperaturstufen einen ähnlichen Verlauf auf. In den ersten drei Minuten sinkt die Viskosität um etwa drei bis vier mPas und steigt anschließend leicht zum Ende der Messung hin an (von 57 auf 59 mPas bei 30° C und von 39 auf 41,5 mPas bei 40° C).

Die Mittelwerte der Messungen und insbesondere die Einzelmessungen weisen mit zunehmender Messdauer einen unruhigen Verlauf auf. Das lässt sich wahrscheinlich auf die Ausbildung einer Anhaftung aus vergeltem Wasserglas am Drehkörper im Kontaktbereich zwischen Wasserglas und Luft zurückführen (Abb. 22).



Abb. 22: Anhaftungen von vergeltem Wasserglas am Drehkörper des Rheometers

Das Wasserglas bestätigt die aus der Arrhenius-Gleichung zu erwartende Abnahme der Viskosität mit zunehmender Temperatur. Die Arrhenius-Gleichung (Gleichung 5) wird in der chemischen Kinetik verwendet, um die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von der Temperatur zu beschreiben. Neben der absoluten Temperatur gehen noch die Aktivierungsenergie und die allgemeine Gaskonstante in die Berechnung ein.

$$k = A \cdot e^{-\frac{EA}{R \cdot T}} \quad (5)$$

k= Reaktionsgeschwindigkeitskonstante

A= Frequenzfaktor

EA= Aktivierungsenergie

R= Universelle Gaskonstante

T= Absolute Temperatur

## Denepox 40

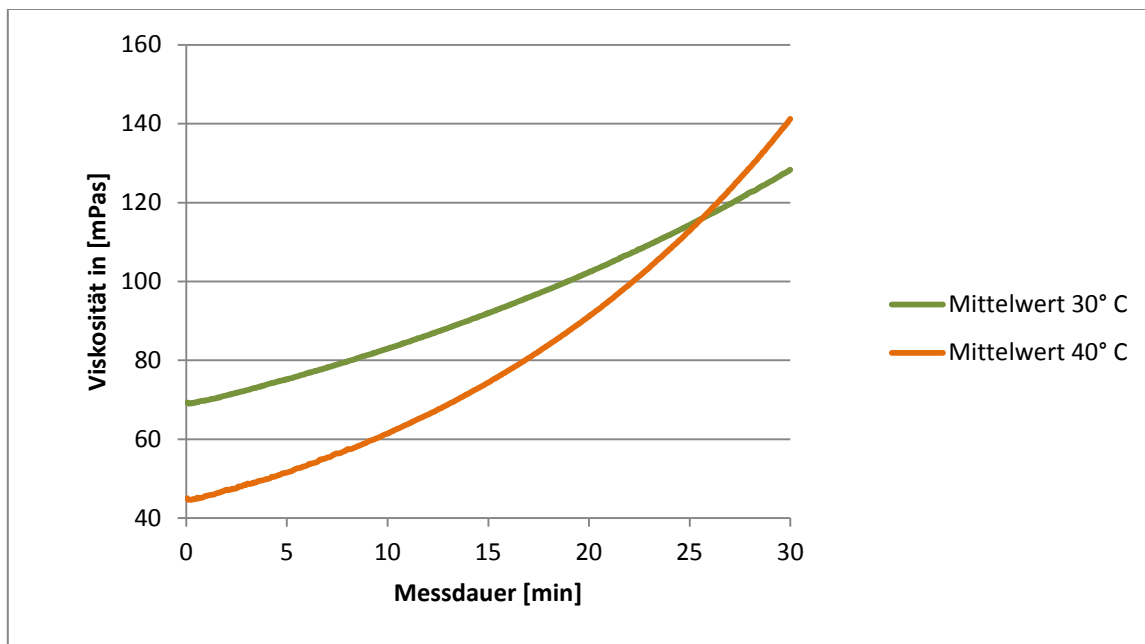


Abb. 23: Mittelwerte der Viskositätsmessungen mit Denepox 40 bei 30 und 40° C.

Eine Auswertung der Verläufe der Viskositätsmessungen des Injektionsharzes Denepox 40 (Abb. 23) zeigt, dass die Mittelwerte beider Messungen zum Ende der Messung eine intensivere Zunahme der Viskosität aufweisen als zu Beginn der Messung, wobei der Viskositätsanstieg bei der höheren Messtemperatur deutlich ausgeprägter ist. Bei der Temperatur von 30° C stiegen die Messwerte im Verlauf der Messung von 69 auf 128 mPas und bei 40° C von 44 auf 141 mPas. Nach einer Messdauer von etwa 25-26 Minuten schneiden sich beide Kennlinien.

Bedingt durch die Zunahme der Reaktionsgeschwindigkeiten bei höheren Temperaturen (Arrhenius-Gleichung), kann eine signifikante Reduktion der Aushärtezeiten von Kunstharzen resultieren[82]. Somit haben Harze bei höheren Temperaturen zwar eine niedrigere Anfangsviskosität, zeigen jedoch mit zunehmender Zeit nach dem Mischen eine stärkere Zunahme der Viskosität. Sowohl die geringere Anfangsviskosität des Harzes bei der höheren Temperatur als auch die beschleunigte Abbindereaktion und schnellere Zunahme der Viskosität sind in Abb. 23 gut zu erkennen.

## Zusammenfassung

In Abb. 24 werden die Mittelwerte der einzelnen Viskositätsmessungen zusammenfassend dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass Wasserglas von den 5 untersuchten Injektionsmitteln die niedrigste Viskosität im Messzeitraum aufweist. Das 2K-Bitumen weist initial zwar eine geringe Viskosität auf, diese steigt allerdings rasch an, sodass die Injizierbarkeit als fraglich eingeschätzt wird.

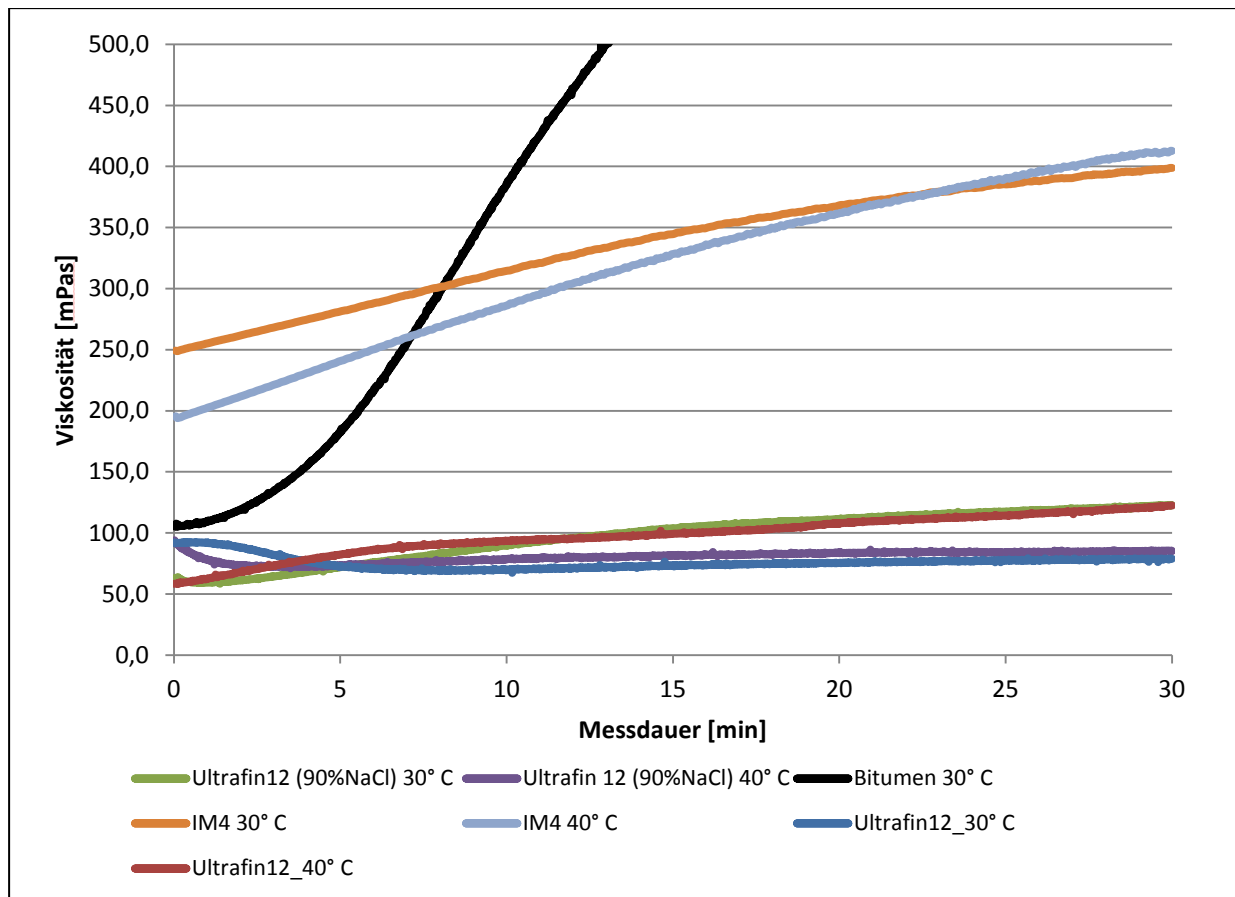


Abb. 24: Zusammenstellung der Mittelwerte der Viskositätsmessungen der partikelgestützten Injektionsmittel

Von den betrachteten partikelgestützten Injektionsmitteln hat das Ulltrafin 12 die niedrigsten Viskositätswerte. Dies gilt bei den Messungen mit 90% NaCl gesättigter Lösung als auch bei den Messungen der mit Leitungswasser hergestellten Suspension. Die gemessenen Viskositäten des Ultrafin 12 sind in einer ähnlichen Größenordnung wie die des Injektionsharzes Denepox 40. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei den partikelgestützten Injektionsmitteln Ultrafin 12 die niedrigste Viskosität aufweist und dass von allen betrachteten Baustoffen das Wasserglas die niedrigste Viskosität hat. Eine Übersicht über die Messungen der partikelfreien Injektionsmittel ist in Abb. 25 gegeben.

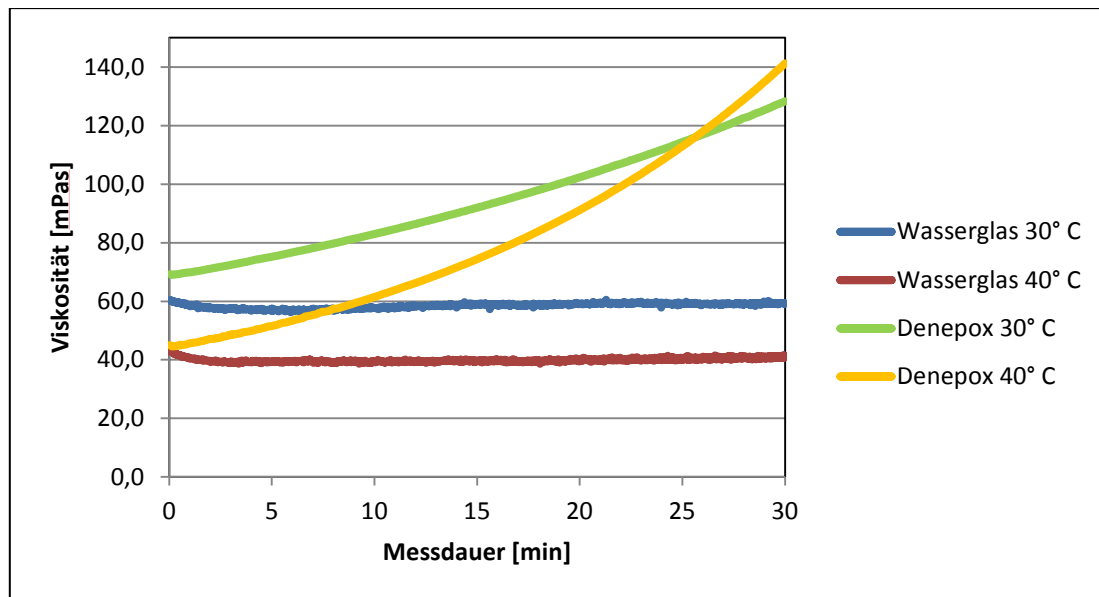


Abb. 25: Zusammenstellung der Mittelwerte der Viskositätsmessungen der partikelfreien Injektionsmittel.

Beim Wasserglas ist darauf hinzuweisen, dass es zu einer deutlichen Abnahme der Viskosität von ca. 30% durch die Erhöhung der Versuchstemperatur von 30 auf 40° C kam. Dieser Befund deckt sich mit den von Vogel[52] durchgeführten Untersuchungen (Abb. 26). In Abb. 26 sind die Ergebnisse von Viskositätsmessungen unterschiedlicher Wassergläser bei 21 und 17 Grad dargestellt, wobei sich selbst bei diesem geringen Temperaturunterschied eine merkliche Änderung in der Viskosität einstellt[52].

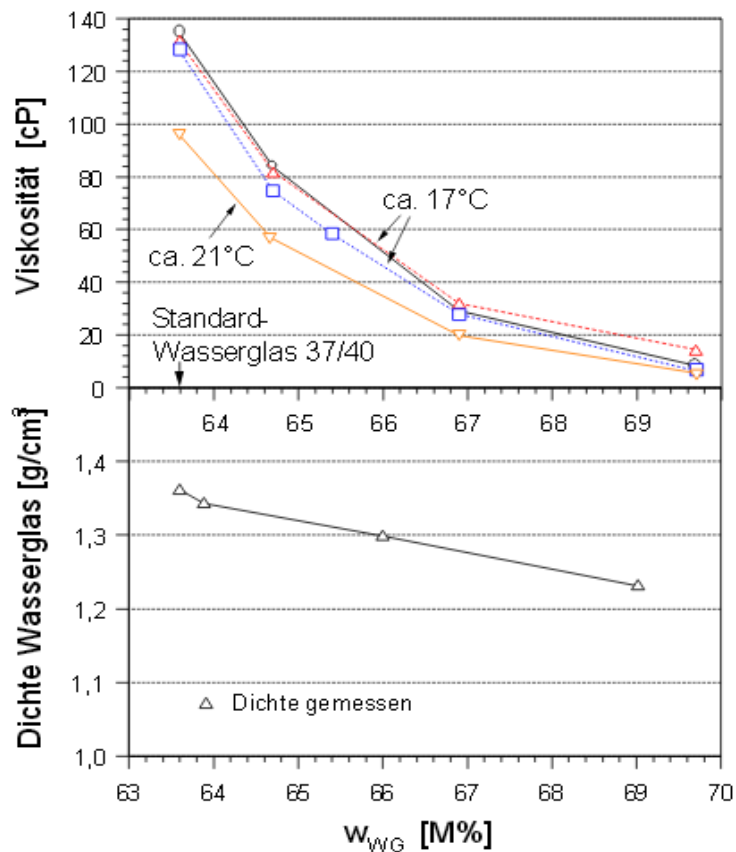


Abb. 26: Unterschiede in der Viskosität von Wassergläsern in Abhängigkeit von der Temperatur sowie ihrem Wasseranteil ( $w_{WG}$ ). Untenstehend ist die Dichteänderung von Wassergläsern mit unterschiedlichen Wasseranteilen dargestellt[52].

### 5.3.2 Rheologie – Marshtrichter

Mit Bezug auf die Ergebnisse der Viskositätsbestimmung mittels Rheometer wurde auf eine Messung der Marshzeit für das 2K-Bitumen bei 40° C verzichtet, da dieses als ungeeignet für Injektionsmaßnahmen eingeschätzt wird. Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen sind in Tab. 16 zusammengestellt.

Eine Messung der Auslaufzeit mit dem Injektionsharz Denepox 40 war mit den verfügbaren Messinstrumenten nicht möglich, da beide Reinigungsmittel (Aceton und Methylethylketon) den Kunststoff des Marshtrichters als auch des Auffangbehälters angreifen und auflösen.

Tab. 16: Marshzeiten (in Sekunden) der Untersuchten Injektionsmittel

	Ultrafin 12		IM 4+		Wasserglas 37/40		2K-Bitumen	
Messung Nr.	30° C	40° C	30° C	40° C	30° C	40° C	30° C	40° C
1	10,61	11,26	27,47	24,02	17,49	16,60	40,52	-
2	10,47	10,62	26,25	23,40	18,31	16,29	40,89	-
3	10,39	11,06	26,82	23,66	17,67	16,05	41,22	-
4	10,59	10,84	27,45	23,76	18,25	16,47	40,65	-
5	10,30	11,07	28,20	23,55	17,75	15,97	41,10	-
6	10,33	10,73	27,84	23,82	17,79	16,18	40,58	-
Mittelwert	10,45	10,93	27,34	23,70	17,88	16,26	40,83	-

Entsprechend der mit dem Rheometer durchgeführten Messungen ist das 2K-Bitumen von den betrachteten Injektionsmittel am wenigsten fließfähig. Das IM 4+ hat bei beiden Temperaturen eine größere Marshzeit als Ultrafin 12 und das Wasserglas. Interessanterweise hat das Ultrafin 12 eine um 6 bis 7 Sekunden kürzere Auslaufzeit als das Wasserglas. Neben der Viskosität haben auch weitere Materialkennwerte, wie z.B. die Dichte der Injektionsmittel, einen Einfluss auf die Marshzeit. Infolge der höheren Dichte des Feinstzements Ultrafin 12 im Vergleich zum Wasserglas kommt es durch das höhere Gewicht der im Marshrichter befindlichen Suspensions-/Flüssigkeitssäule zu einer kürzeren Auslaufzeit. Abgesehen vom Ultrafin 12 zeigen die beiden anderen Injektionsmittel bei der höheren Temperatur eine Abnahme der Marshzeit.

### 5.3.3 Dichtemessung

Die Ergebnisse der Dichtebestimmung der einzelnen Injektionsmittel bei 30 und 40° C werden in Tab. 17 dargestellt. Die Ergebnisse der einzelnen Messungen befinden sich im Anhang.

Tab. 17: Dichte der verschiedenen Injektionsmittel bei 30 und 40° C

Injektionsmittel	IM 4+	Ultrafin 12	Wasserglas 37/40	Denepox 40	2K-Bitumen	Ultrafin 12 (Salzlösung)
Dichte bei 30° C	1,846 g/cm <sup>3</sup>	1,415 g/cm <sup>3</sup>	1,363 g/cm <sup>3</sup>	1,062 g/cm <sup>3</sup>	0,965 g/cm <sup>3</sup>	1,704 g/cm <sup>3</sup>
Dichte bei 40° C	1,840 g/cm <sup>3</sup>	1,412 g/cm <sup>3</sup>	1,357 g/cm <sup>3</sup>	1,054 g/cm <sup>3</sup>	-	1,696 g/cm <sup>3</sup>
Differenz je Grad Celsius	0,0006	0,0006	0,0006	0,0008		0,0008

Bei der Dichtebestimmung kam es nur zu geringen Schwankungen der Messwerte um den Mittelwert (Die Ergebnisse Einzelmessungen befinden sich im Anhang). Bei der höheren Temperatur hatten die Injektionsmittel immer eine geringere Dichte. Beim Wasserglas und IM 4+ hatte sich die Dichte um 0,006 g/cm<sup>3</sup> verringert, beim Ultrafin 12 um 0,003 g/cm<sup>3</sup> und beim Denepox 40 um 0,008 g/cm<sup>3</sup>. Während des Anmischens des 2K-Bitumens bei 40° C steifte dieses soweit an, dass der Glaskörper nicht mehr in das Injektionsmittel eingetaucht ist und daher eine Dichtemessung nicht möglich war.

### 5.3.4 Grenzflächenspannung

Die Grenzflächenspannung oder auch Oberflächenspannung ist ein Wert, der angibt, wieviel Arbeit verrichtet werden muss, um die Oberfläche eines Fluides um einen bestimmten Betrag zu vergrößern. Aus der Washburn-Gleichung (Gleichung 6) ergibt sich, dass das Eindringvermögen von Flüssigkeiten in poröse Medien bei höherer Oberflächenspannung besser ist.

$$L^2 = \frac{\gamma D t}{4\eta} \quad (6)$$

L= Eindringtiefe

γ= Oberflächenspannung

D= Porendurchmesser

t= Zeit

η= Viskosität

Die Ergebnisse der einzelnen Messungen der Oberflächenspannung befinden sich im Anhang. In Abb. 27 werden die gemessenen Oberflächenspannungen der einzelnen Injektionsmittel zusammenfassend dargestellt.

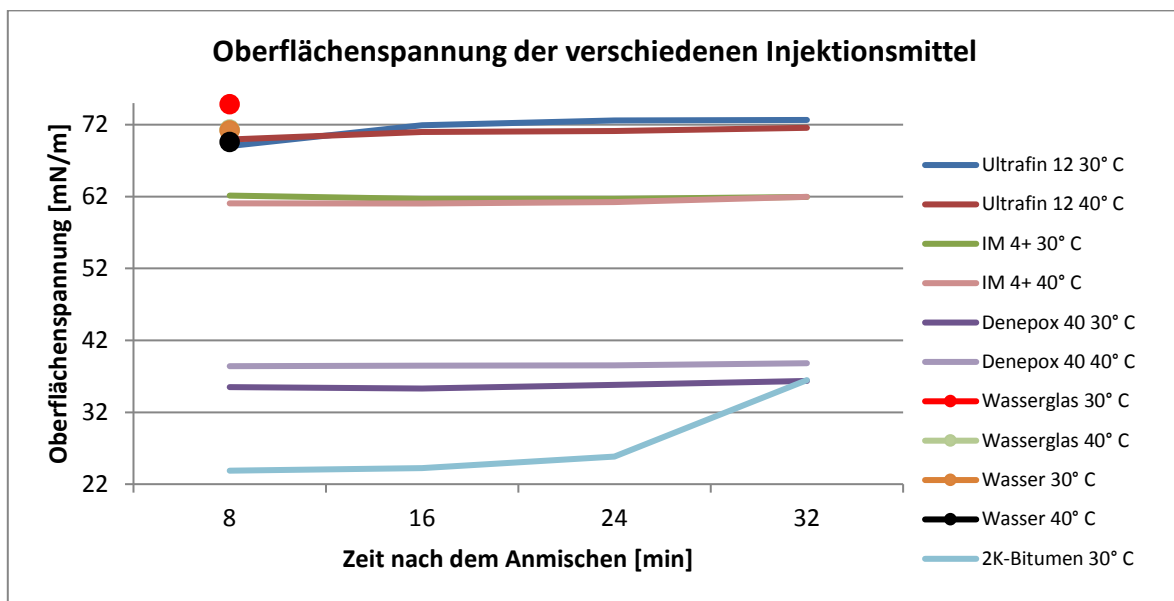


Abb. 27: Zusammenfassung der Oberflächenspannung der untersuchten Injektionsmittel bei 30 und 40° C.

Die Oberflächenspannung des Wasserglases ist als einzige höher als die Oberflächenspannung von Wasser. Ultrafin 12 hat bei beiden Temperaturen ähnliche Oberflächenspannungen wie Wasser. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass es bei der gewählten Rezeptur in geringem Maße zum Wasserabsetzen kommt und sich auf der Oberfläche des Probenhalters ein dünner Wasserfilm ausbildet, der dann am Platinplättchen emporsteigt. Am niedrigsten ist die Oberflächenspannung des 2K-Bitumens. Das 2K-Bitumen zeigt über den Verlauf der Messung einen Anstieg der Oberflächenspannung von 23,876 mN/m auf 36,470 mN/m. Der Anstieg der Oberflächenspannung ist auf ein zunehmendes Ansteifen des 2K-Bitumens zurückzuführen. Etwa 25 bis 30 Minuten nach dem Anmischen ist das 2K-Bitumen bereits soweit ausgehärtet, dass es nicht mehr fließfähig ist (Auch wenn das Gefäß mit dem 2K-Bitumen auf den Kopf gestellt wird fließt das 2K-Bitumen nicht heraus). Bei 40° C steift das 2K-Bitumen wesentlich schneller an und ist nach 5 bis 7 Minuten nach dem Anmischen nicht mehr fließfähig. Daher war eine Messung der Oberflächenspannung des 2K-Bitumens bei 40° C nur sehr schwer durchführbar und nicht sinnvoll, da bei solch einem raschen Ansteifen das 2K-Bitumen nicht injizierbar ist.

### 5.3.5 Kontaktwinkel

In Abb. 28 und Abb. 29 sind exemplarisch die Häufigkeitsverteilungen für die beiden Injektionsmittel Ultrafin 12 und Wasserglas dargestellt. Auffällig ist, dass beim Wasserglas im Gegensatz zu Ultrafin 12 eine Häufung größerer Kontaktwinkel gemessen wurde. Bei den Kontaktwinkeln beider Materialien lässt sich sehr gut ein Trend zu größeren Kontaktwinkeln bei höheren Temperaturen feststellen. Hierbei ist festzuhalten, dass es bei dem Wasserglas einen relativ großen Übergangsbereich (38°-52°) zwischen den Kontaktwinkeln beider Temperaturstufen gibt.

Eine wichtige Beobachtung während der Messung war die Tatsache, dass Wasserglas bei höheren Temperaturen dazu neigt, frühzeitig eine Haut auszubilden. Diese bleibt unter Umständen als Rüssel



an der Nadel kleben wenn man versucht, diese aus dem Tropfen heraus zu ziehen. Die Haut ist nach kurzer Zeit derart belastbar, dass sie den gesamten Tropfen trägt, wobei dieser seine Kontur nicht mehr verändert. In die Ergebnisse wurden nur Einzelversuche aufgenommen, bei welchen dieser Effekt nicht zum Tragen kam. Jedoch sind die Ergebnisse insgesamt mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Der Feinstzement Ultrafin 12 sowie die weiteren betrachteten Injektionsmittel zeigten hingegen ein weitaus einheitlicheres Verhalten. Einzig bei den Messungen bei 30° C mit dem 2K-Bitumen und bei Denepox 40 bei 40° C (18°) gab es jeweils einen „Ausreißerwert“ (9°). Bei der Bildung der Mittelwerte wurden diese Außreißerwerte nicht mit einbezogen. Als Beispiel für die Verteilung der gemessenen Kontaktwinkel wird die Häufigkeitsverteilung der Messungen mit Ultrafin 12 im Textkörper abgebildet (Abb. 29), die Häufigkeitsverteilungen der anderen Messungen befinden sich im Anhang.

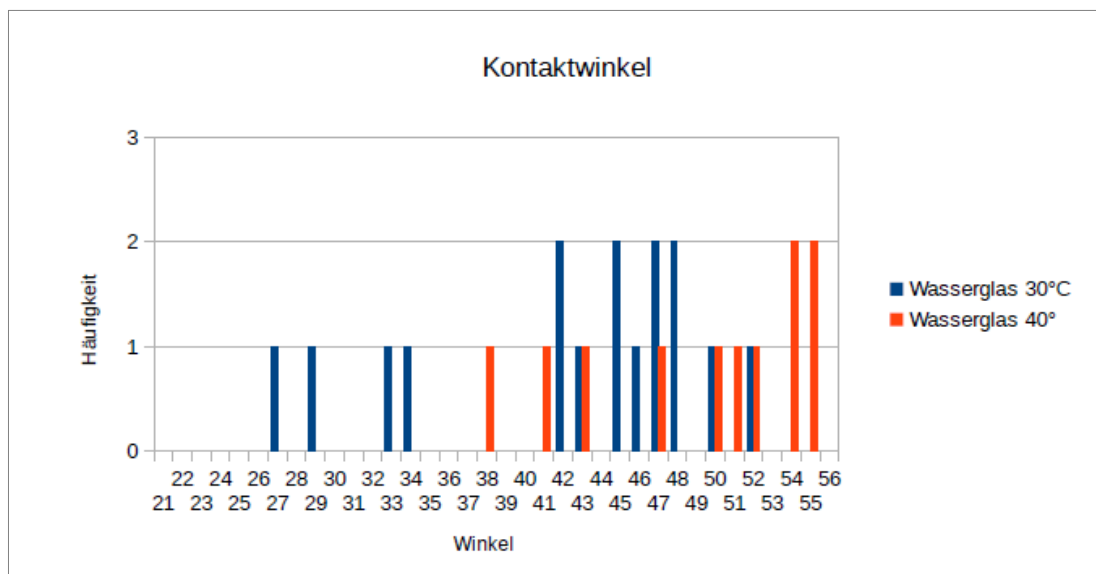


Abb. 28: Häufigkeit der gemessenen Kontaktwinkel von Wasserglas bei 30 und 40° C.

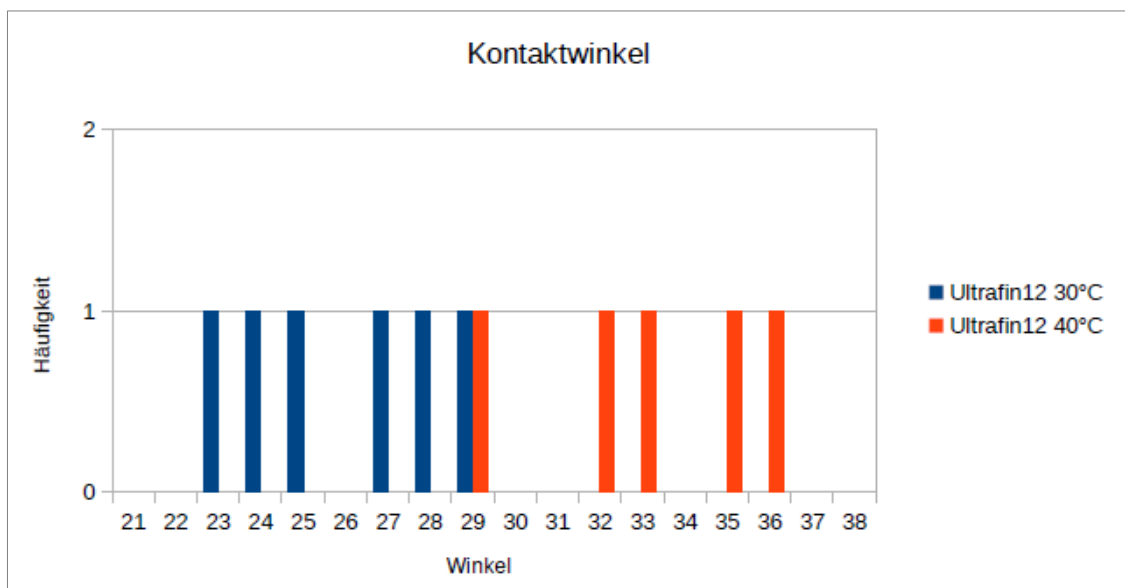


Abb. 29: Häufigkeit der gemessenen Kontaktwinkel von Ultrafin 12 bei 30 und 40° C.

Die Eötvössche Regel (Gleichung 7) besagt, dass die Oberflächenspannung jeder Flüssigkeit eine Funktion der Temperatur darstellt. In der Gleichung von Young (Gleichung 8) wird der Kontaktwinkel einer Flüssigkeit unter Zuhilfenahme der Oberflächenspannung ermittelt. Dies bedeutet, dass eine Temperaturabhängigkeit der Kontaktwinkel der untersuchten Flüssigkeiten zu erwarten ist.

$$\gamma \cdot V_m^{2/3} = k (T_c - T) \quad (7)$$

$\gamma$ = Oberflächenspannung der Flüssigkeit

$V_m$ = Molare Volumen

$k$ = Eötvöss Konstante (2,1 erg/K\* $\text{mol}^{2/3}$ )

$T_c$ = kritische Temperatur der Flüssigkeit

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{SG} - \sigma_{LS}}{\sigma_{LG}} \quad (8)$$

$\theta$ = Kontaktwinkel zwischen Flüssigkeit und umgebenden Gas

$\sigma_{SG}$ = Oberflächenenergie (Zwischen dem ebenen Festkörper und dem umgebenden Gas)

$\sigma_{LS}$ = Grenzflächenenergie (Zwischen Festkörper und Flüssigkeitstropfen)

$\sigma_{LG}$ = Oberflächenspannung (Flüssigkeit)

Sowohl das Wasserglas als auch Ultrafin 12 weisen bei der höheren Temperatur höhere Kontaktwinkel auf. Allerdings ist es gerade bei Wasserglas äußerst schwierig sinnvoll einen Mittelwert der Kontaktwinkelmessungen zu erstellen, da die Messwerte über einen sehr weiten Bereich streuen (26,3° – 51,8° bei 30° C) und (37,1° – 54, 8° bei 40° C). Wenn alle erhaltenen Messwerte gemittelt werden erhält man bei 30° C einen Kontaktwinkel von 41,76 ° und bei 40° C von 48,40. Nachstehend sind in Tab. 18 die Mittelwerte der weiteren Messungen angegeben. Auch hier lässt sich beobachten, dass die Kontaktwinkel bei 40° C größer sind als bei der niedrigeren Temperaturstufe.

Tab. 18: Mittelwerte und Einzelmesswerte der Kontaktwinkelmessungen.

Ultrafin 12		IM 4+		Denepox 40		2K-Bitumen	
30° C	40° C	30° C	40° C	30° C	40° C	30° C	40° C
23	28	45	49	27	30	24	22
27	32	41	47	32	26	14	15
24	34	41	41	28	26	15	16
27	32	42	55	33	31	16	23
23	36	42	48	31	33	20	18
29	35	51	51	27	28		20
<b>25,4</b>	<b>32,8</b>	<b>43,7</b>	<b>48,5</b>	<b>29,7</b>	<b>29,0</b>	<b>17,8</b>	<b>19,0</b>

In Tab. 19 sind die Kontaktwinkel der Einzelmessungen und der Durchschnittswerte aufgeführt. Der Grund für die Vergrößerte Anzahl an Messungen für das Injektionsmaterial Wasserglases ist auf die schlechte Handhabbarkeit zurückzuführen. Es deutete sich schon zu Beginn der Messungen an, dass größere Streubreiten zu erwarten sind.

Tab. 19: Wasserglas: Kontaktwinkel, Einzelmessungen und Mittelwerte

Messung Nr.	Wasserglas 30° C	Wasserglas 40° C
1	33,4	54,8
2	32,2	49,1
3	49,1	46,4
4	28,0	42,1
5	26,3	53,1
6	41,2	40,6
7	41,7	53,4
8	42,0	54,3
9	47,7	37,1
10	45,7	50,1
11	51,6	51,4
12	44,5	
13	46,6	
14	44,9	
15	47,2	
16	46,0	
<b>Mittelwert</b>	<b>41,76</b>	<b>48,40</b>

#### 5.4 Theoretische Betrachtungen zum Eindringverhalten der Injektionsmaterialien

Das Eindringverhalten von Fluiden in poröse Medien wird durch eine Reihe von Materialkennwerten des Fluids als auch des durchströmten Mediums beeinflusst. Die verschiedenen Materialkennwerte beeinflussen das Eindringverhalten jedoch nicht gleichermaßen, sondern haben unterschiedliche Gewichtungen. Um diesen Aspekt zu berücksichtigen, sollen die bei den rheologischen Untersuchungen ermittelten Messwerte im Rahmen einer theoretischen Betrachtung zur Ermittlung eines rechnerischen Eindringverhaltens der untersuchten Injektionsmittel herangezogen werden. Hierfür werden sowohl die Hagen-Poiseuille Gleichung als auch die Young-Laplace Gleichung verwendet.

Durch ein Zusammenführen dieser beiden Gleichungen erhält man eine Formel, mit Hilfe derer sich die Eindringstrecke einer Flüssigkeit in eine horizontale zylindrische Pore in Abhängigkeit von der Zeit berechnen lässt. Die auf diesem Wege berechneten Werte lassen sich nicht 1:1 in die Realität übertragen, da zur Berechnung Annahmen getroffen werden müssen, jedoch ermöglicht die Berechnung der Eindringstrecke eine Abschätzung über die Eindringfähigkeit der Injektionsmittel in ein poröses Medium. Im Folgenden werden die zur Berechnung getroffenen Annahmen erläutert und es wird der zur Berechnung herangezogene, aus der Young-LaPlace und Hagen-Poiseuille Gleichung erstellte Algorithmus erläutert.

Die Young-Laplace Gleichung (Gleichung 9) beschreibt den Zusammenhang zwischen der Oberflächenspannung, dem Druck sowie der Oberflächenkrümmung einer Flüssigkeit. Für beliebig gekrümmte Oberflächen in Röhren, bei denen der Meniskus der benetzenden Flüssigkeit auf der Zylinderwand ungleich 90° ist, beschreibt die folgende Gleichung die Druckdifferenz über die Oberfläche:

$$\Delta p_c = \frac{2\gamma \cdot \cos\theta}{r} \quad (9)$$

$\Delta p_c$  = Druckdifferenz an der Grenzfläche Flüssigkeit/Gas

$\gamma$  = Oberflächenspannung

$\cos\theta$  = Kontaktwinkel

$r$  = Radius der zylindrischen Pore

Desweiteren wird zur Berechnung der zeitabhängigen Eindringstrecke die Hagen-Poiseuille- Gleichung verwendet, die das Volumen einer homogenen Newton'schen Flüssigkeit pro Zeiteinheit angibt, das unter laminarer stationärer Strömung durch eine Kapillare mit einem definierten Radius und einer bestimmten Länge strömt (Gleichung 10):

$$V = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8\eta l} \quad (10)$$

$V$  = Volumenstrom durch die Kapillare

$r$  = Radius der Kapillare

$\Delta p$  = Druckdifferenz zwischen Anfang und Ende der Kapillare

$\eta$  = Dynamische Viskosität des strömenden Fluids

$l$  = Länge der Kapillare

Die beiden vorher genannten Gleichungen (Gleichung 9 und Gleichung 10) dienen der Beschreibung des Eindringverhaltens von Flüssigkeiten in Kapillaren, wobei beide Gleichungen unterschiedliche Materialkennwerte enthalten, die einen Einfluss auf das Strömungsverhalten haben. Dies sind bei der Young-Laplace Gleichung die Oberflächenspannung und der Kontaktwinkel und bei der Hagen-Poiseuille Gleichung die Viskosität. Um diese Materialkennwerte direkt miteinander in Beziehung zu setzen, werden beide Gleichungen zusammengeführt. In der Young-Laplace Gleichung wird für  $\Delta p_c$  die Druckdifferenz  $\Delta p$  aus der Hagen-Poiseuille Gleichung eingesetzt, wodurch man die Folgende Gleichung erhält:

$$\frac{8\eta l V}{\pi r^4} = \frac{2\gamma \cdot \cos\theta}{r} \quad (11)$$

Der Volumenstrom  $V$  kann auch als Produkt der durchströmten Fläche und der durchströmten Länge der Kapillare pro Zeiteinheit ( $\pi r^2 \cdot dl/dt$ ) ausgedrückt werden. Durch Ersetzen von  $V$  und anschließendes Umstellen erhält man Gleichung 12:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{\gamma \cdot \cos\theta \cdot r}{4 \cdot \eta \cdot l(t)} \quad (12)$$

Anschließendes Integrieren über  $l(t)$  ergibt schließlich folgende Gleichung:

$$l(t) = \sqrt{\frac{r \cdot \gamma \cdot \cos\theta}{2\eta}} \cdot t \quad (13)$$

$l(t)$  gibt die Wegstrecke an, die eine benetzende Flüssigkeit in einer bestimmten Zeit in einer horizontalen Kapillare mit einem bekannten Radius zurücklegen kann. Die zurückgelegte Strecke ist von den rheologischen Eigenschaften des benetzenden Fluids abhängig (Kontaktwinkel, Oberflächenspannung, dynamische Viskosität). Bei der Berechnung erfolgt eine Gewichtung, da der Kontaktwinkel über den cos und die Viskosität mit dem Faktor zwei multipliziert wird. Die Strecke  $l(t)$ ,

die berechnet wird, bietet somit eine sehr realitätsnahe Möglichkeit, das Eindringverhalten der unterschiedlichen Injektionsmittel miteinander zu vergleichen, da alle rheologischen Eigenschaften der Injektionsmaterialien inklusive ihres Einflusses bzw. ihrer Gewichtung berücksichtigt werden.

Da einige der rheologischen Kennwerte zeitabhängig ermittelt wurden, wird das Eindringverhalten zu zwei verschiedenen Zeitpunkten ermittelt; zum einen mit den Messwerten direkt nach dem Anmischen des Injektionsmittels und zum anderen mit den Werten nach einer halben Stunde. Die zur Berechnung herangezogenen Messwerte und die Zeitpunkte zu denen diese ermittelt wurden sind in Tab. 20 zusammengestellt. Da der Kontaktwinkel nicht in Abhängigkeit von der Zeit ermittelt wurde, werden die direkt nach dem Anmischen ermittelten Messwerte für beide Zeiträume verwendet. Für das Wasserglas ließ sich nur für den ersten Zeitraum (8 Minuten nach dem Anmischen) die Oberflächenspannung ermitteln, da es bei längeren Messzeiten zur Ausbildung einer dünnen aus vergeltem Wasserglas bestehenden Haut auf der Oberfläche der Flüssigkeit kam. Dadurch waren Messungen zu späteren Zeitpunkten nicht möglich. Die Oberflächenspannung ließ sich zudem beim 2K-Bitumen nur bei einer Temperatur von 30°C ermitteln, da es bei den Messungen bei 40°C zum sehr schnellen Ansteifen des 2K-Bitumens kam, wodurch die Messung der Oberflächenspannung nicht mehr möglich war.

Tab. 20: Zusammenstellung der für die Berechnung der Eindringtiefe in eine horizontale, zylindrische Kapillare verwendeten rheologischen Materialkennwerte

Materialkennwerte	Oberflächenspannung		Viskosität		Kontaktwinkel
Zeitraum 1	8 Minuten nach Anmischen		0-5 Minuten nach Anmischen		Direkt nach Anmischen
Zeitraum 2	32 Minuten nach Anmischen		25-30 Minuten nach Anmischen		Direkt nach Anmischen
Injektionsmittel	Wasserglas 37/40	Ultrafin 12	Im 4+	Denepox 40	2K-Bitumen
Materialkennwert	Zeitraum 1				
Oberflächenspannung [mN/M] (30°C/40°C)	74,849/ 74,849	69,030/ 69,939	62,138/ 61,061	35,506/ 38,410	23,876/-
Viskosität [mPa/s] (30°C/40°C)	59,0/39,9	66,6/70,5	266,7/219,2	72,2/48,2	132/1541
Kontaktwinkel [Grad] (30°C/40°C)	41,8/48,4	25,4/32,8	43,7/48,5	29,7/29,0	17,8/19,0
Materialkennwert	Zeitraum 2				
Oberflächenspannung [mN/M] (30°C/40°C)	71,349/ 71,349	72,657/ 71,562	61,966/ 61,963	36,356/ 38,820	38,470/-
Viskosität [mPa/s] (30°C/40°C)	59,2/40,7	120,6/118,2	391,7/401,5	120,6/125,2	-

Unter Verwendung der in Tab. 20 dargestellten Daten wurde mit dem aus der Young-Laplace Gleichung und der Hagen-Poiseuille Gleichung abgeleiteten Algorithmus die Eindringtiefe der unterschiedlichen Injektionsmittel in eine horizontale zylindrische Kapillare mit einem Durchmesser von 100 µm innerhalb von 60 Sekunden berechnet. Das Ergebnis der Berechnung ist in Abb. 30 dargestellt. Für jedes Injektionsmittel wurde die Eindringtiefe viermal berechnet, wobei zwei verschiedene Temperaturen der Injektionsmittel (30 und 40°C) sowie zwei verschiedene Zeitpunkte bzw. Zeiträume (vgl. Tab. 20) für die Berechnung herangezogen wurden.

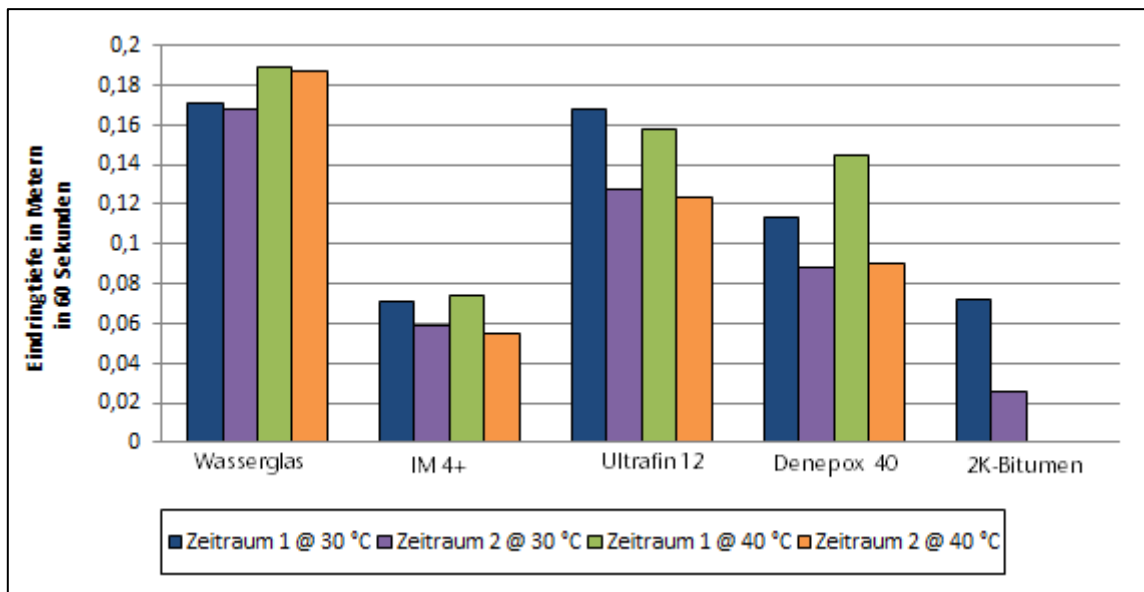


Abb. 30: Darstellung der Eindringtiefe der unterschiedlichen Injektionsmittel in den zwei verschiedenen Zeiträumen in eine horizontale Kapillare mit einem Durchmesser von 100 µm.

Zu erkennen ist aus Abb. 30, dass die Injektionsmittel sich nicht nur in der Eindringtiefe unterscheiden, sondern dass es auch Unterschiede zwischen den Injektionsmitteln hinsichtlich des temperatur- und zeitabhängigen Eindringverhaltens gibt. Von den untersuchten Injektionsmitteln dringt das Wasserglas in der gegebenen Zeit am weitesten in die Kapillare ein und das 2K-Bitumen erreicht die geringste Eindringtiefe. Das Wasserglas zeigt zudem einen sehr geringen zeitabhängigen Unterschied der Eindringtiefe und dringt als einziges Injektionsmittel bei der höheren Temperatur innerhalb der beiden Zeiträume weiter in die Kapillare ein. Das Ultrafin 12 hat im ersten Zeitraum ein annähernd so gutes Eindringverhalten wie das Wasserglas, allerdings ist eine deutliche Verringerung des Eindringverhaltens über die Zeit festzustellen. Beim Injektionsharz Denepox 40 fällt auf, dass dieses im ersten Zeitraum bei 40°C ein deutlich besseres Eindringverhalten hat als bei 30°C, jedoch die Reduzierung des Eindringverhaltens vom ersten zum zweiten Berechnungszeitraum bei der höheren Temperatur deutlich ausgeprägter ist und im zweiten Zeitraum das Injektionsharz bei beiden Temperaturen etwa gleichweit eindringt. Das IM 4+ weist im Vergleich mit den anderen Injektionsmitteln relativ geringe zeit- und temperaturabhängige Streubreiten der Eindringtiefe auf, allerdings ist dies auch mit Ausnahme des 2K-Bitumens das Injektionsmittel mit der geringsten Eindringtiefe.

Die theoretisch ermittelte Eindringtiefe der unterschiedlichen Injektionsmittel in eine horizontale Kapillare zeigt, dass von den untersuchten partikelfeinen Injektionsmittel das Natronwasserglas das beste Eindringverhalten aufweist. Bei den partikelgestützten Materialien weist das Ultrafin 12 das beste Eindringverhalten auf. Daher sollen diese beiden Materialien im weiteren Verlauf für die Injektionsversuche an der künstlichen Kontaktfuge verwendet werden.

Im Rahmen der Injektionsversuche soll das Eindringverhalten unterschiedlicher Injektionsmittel in Kontaktfugen zwischen Steinsalz und verschiedenen typischen Baustoffen für Streckenverschlussbauwerke erfolgen. Da hierbei die Betrachtung des Eindringverhaltens in unterschiedlich ausgebildete Kontaktfugen im Vordergrund steht, wird das Ultrafin 12 auch im Kontakt mit dem Sorelbeton eingesetzt. Dies ist bei der Injektion von realen Streckenverschlussbauwerken keine zulässige Materialkombination, da es aufgrund von  $\text{Ca}^{2+}$  und  $\text{Mg}^{2+}$  Austauschreaktionen zu

Korrosionsprozessen in beiden Baustoffen entlang des Kontaktbereichs kommt. Diese Korrosionsprozesse haben jedoch keinen Einfluss auf das Eindringverhalten des Injektionsmittels. Daher ist eine Injektion des Feinstzementes Ultrafin 12 in eine Kontaktfuge zwischen Sorelbeton und Steinsalz zur Betrachtung und Auswertung des Eindringverhaltens sowie zum Vergleich des Eindringverhaltens mit Wasserglas unter diesen Aspekten sinnvoll.

## 6 Modellversuche zur Erzeugung und Injektion einer Kontaktfuge im Labor

Bei der Kontaktfugeninjektion haben eine Reihe von Faktoren, wie z.B. die Öffnungsweite der Wegsamkeit oder die Oberflächenbeschaffenheit entlang der Kontaktfuge einen Einfluss auf das Eindringverhalten von Injektionsmitteln. Diese Faktoren fanden keine Berücksichtigung bei den im Labor ermittelten rheologischen Kenndaten sowie dem daraus ermittelten theoretischen Eindringverhalten. Daher sollen mit den auf Grundlage des theoretischen Eindringverhaltens am geeignetsten erachteten Materialien anwendungsbezogene Injektionsversuche an künstlich erzeugten Kontaktfugen durchgeführt werden. Bei diesen Injektionsversuchen sollen unter anderem Informationen über das Eindringverhalten von jeweils einem partikelfreien (Natronwasserglas) und einem partikelgestützten (Feinstzement Ultrafin 12) Injektionsmittel in einen geschädigten und somit permeablen Kontaktbereich zwischen verschiedenen Baustoffen für Streckenverschlussbauwerke und Steinsalz ermittelt werden.

Bei großmaßstäblich errichteten Streckenverschlussbauwerken weisen die für die Kontaktfugenbildung relevanten Schwindprozesse ein Schwindmaß von wenigen Millimetern pro Meter Baustoff auf. Aufgrund der Streckenhöhe von meist mehreren Metern kommt es somit zum Aufbau von erheblichen Zugspannungen, die im Kontaktbereich Baustoff/Gebirge zur Ausbildung der Kontaktfuge führen. Im Labormaßstab treten aufgrund des in den Probenkörpern eingesetzten geringen Baustoffvolumens deutlich geringere Zugspannungen auf und es bildet sich keine Kontaktfuge. Daher sollen die Probenkörper für die Laborversuche nach einer definierten Abbindezeit im Spaltzugversuch geschädigt werden, wodurch die Bildung einer künstlichen Kontaktfuge erzielt wird. Um das Eindringverhalten der Injektionsmittel insbesondere in Wegsamkeiten mit geringen Öffnungsweiten untersuchen zu können, soll die im Spaltzugversuch erzeugte Kontaktfuge eine Öffnungsweite von ca. 150  $\mu\text{m}$  aufweisen. Die Erzeugung der künstlichen Kontaktfuge im Spaltzugversuch ermöglicht es, Erkenntnisse zum Einfluss des Abbindeverhaltens unterschiedlicher zement- oder MgO-basierter Baustoffe auf die Ausbildung des geschädigten Kontaktbereichs zu ermitteln.

An der künstlichen Kontaktfuge werden nach dem Spaltzugversuch Injektionsversuche durchgeführt. Das Ziel dieser Versuche ist es, das Ausbreitverhalten ausgewählter Injektionsmittel im Bereich der Kontaktfuge zu untersuchen. Da das Eindringverhalten der Injektionsmittel in die Kontaktfuge über die rheologischen Eigenschaften hinaus durch chemische Reaktionen, die im Kontakt mit dem Baustoffen und dem anstehenden Salz ablaufen, bestimmt wird, ist die Injektion der künstlichen Kontaktfuge eine realitätsnahe Nachbildung der Kontaktfugeninjektion von Streckenverschlussbauwerken im Labormaßstab. Zudem ermöglicht die Injektion von Wasserglas in die erzeugten Kontaktfugen den Kenntnisstand hinsichtlich des Erhärtungsverhaltens von Natronwasserglas im Kontakt mit Steinsalz als auch im Kontakt mit für Streckenverschlussbauwerke üblichen Baustoffen zu erweitern.

Für die Injektionsversuche an der künstlichen Kontaktfuge werden Salzbohrkerne achsparallel halbiert, anschließend eine Injektionsleitung im Kontaktbereich verlegt und die zweite Hälfte des Kerns durch Beton substituiert. Nach einer definierten Abbindezeit werden die Probenkörper im Spaltzugversuch geschädigt, wobei entlang des Kontaktbereichs Beton/Steinsalz ein Riss erzeugt wird, dessen Öffnungsweite stirnseitig am Probenkörper gemessen wird. Bei einer gemessenen Öffnungsweite von 150  $\mu\text{m}$  wird der Spaltzugversuch abgebrochen. Nachfolgend werden die zu untersuchenden Injektionsmittel über die Injektionsleitung in den Kontaktbereich zwischen Steinsalz und Beton injiziert.



## 6.1 Gewinnung und Herstellung der Probenkörper

Zur Herstellung der Probenkörper wurden in Bernburg im Steinsalzbergwerk der ESCO Salt Steinsalz Bohrkern mit einem Durchmesser von 215 mm entnommen. Das Salz hat einen NaCl-Gehalt von 99,8 % und eine mittel- bis grobkristalline Struktur mit einer mittleren Korngröße zwischen einem und zwei Zentimetern.

Nach der Entnahme wurden die Kerne bei 20° C im Trockenschrank gelagert und im Spaltzugversuch achsparallel halbiert. Durch das Halbieren der Kerne im Spaltzugversuch wurde versucht, eine Oberfläche entlang der Bruchfläche zu erzeugen, die in Bezug auf die Rauigkeit und Struktur möglichst die Eigenschaften einer per Teilschnittmaschine nachgeschnittenen Strecke repräsentiert.

Bei den im ERAM zu errichtenden Streckenverschlüssen ist es vorgesehen, nach dem Entfernen der Auflockerungszone durch den Nachschnitt der Streckenkontur die Injektionsleitungen in Schlitz entlang der Streckenkontur einzulassen[8]. Durch das Verlegen der Injektionsleitungen in den Schlitz soll sichergestellt werden, dass diese bei der Betonage des Streckenverschlussbauwerks ihre Lage nicht verändern und eine Anbindung an den Kontaktbereich besitzen. Dieses Prinzip kam auch bei der Herstellung der Probenkörper zum Einsatz. Nach dem Spaltzugversuch wurde entlang der Bruchkante ein knapp 2 cm breiter und ca. 1 cm tiefer Schlitz der Länge nach in den halbierten Salzkern gesägt. In diesem verlief die Injektionsleitung (Abb. 31). Hiermit sollte wie bei der Betonage des Streckenverschlussbauwerks sichergestellt werden, dass die Injektionsleitung beim Betonieren lagefixiert ist und auch nachfolgend noch eine Anbindung an den Kontaktbereich aufweist. Als Schalung zum Betonieren der Probenkörper wurde ein Kunststoffrohr mit einem Innendurchmesser von 215 mm verwendet, das auf beiden Stirnseiten mit einer Pressspanplatte geschlossen und mit Silikon luftdicht verschlossen war.



Abb. 31: Links: Halbierter Salzkern mit der Kerbe für die Injektionsleitung. Mitte: In der Verschalung fixierte Injektionsleitung. Rechts: Halbierter Salzkern mit der in der Kerbe verlegten Injektionsleitung während des Gießens des Betons.

Für die Injektionsleitung wurde in den auf beiden Stirnseiten verwendeten Spanplatten eine Durchgangsbohrung erstellt, wobei die Injektionsleitung in der unteren Spanplatte mit Silikon befestigt wird.

Während der Betonage des Probenkörpers wurde zuerst eine 2 cm mächtige Schicht Beton in das Rohr gefüllt, auf die der halbierte Salzkern gestellt wurde. Anschließend wurde die Injektionsleitung in die Kerbe des halbierten Salzkerns gedrückt (Abb. 31, Linkes Bild) und die Verschalung mit dem Beton aufgefüllt, wobei auch auf die obere Stirnseite des Salzkerns eine 2 cm mächtige Betonschicht aufgebracht wurde. Somit befinden sich auf beiden Stirnseiten des Probenkörpers 2 cm mächtige

Betonschichten, in denen auf beiden Seiten nach dem Spaltzugversuch die Schraubpacker eingeschraubt wurden. Über die Schraubpacker können die Probenkörper zum Injizieren an die Injektionspumpe angeschlossen werden. Beim Betonieren wurde darauf geachtet, dass die Injektionsleitung über die gesamte Länge des Kerns Kontakt mit dem Salz hat, wodurch verhindert werden sollte, dass die Injektionsleitung bei der Probenherstellung vom Beton umschlossen wird. Somit wurde sichergestellt, dass die entlang des Kontaktbereichs verlaufende Kontaktfuge nach dem Spaltzugversuch injizierbar war. In Abb. 32 ist eine Nahaufnahme der Injektionsleitung im Kontaktbereich Beton/Salz dargestellt, die zeigt, dass der Kontaktbereich sehr gut an die Injektionsleitung angebunden ist.



Abb. 32: Anbindung der Injektionsleitung an den Kontaktbereich zwischen Beton und Salzkern

Zur Herstellung der Probenkörper kamen zwei verschiedene Betonsorten zum Einsatz. Zum einen wurde der im ERAM zur bergbaulichen Gefahrenabwehrmaßnahme Zentralteil eingesetzte bGZ-Salzbeton verwendet und zum anderen der Magnesiabinder MB10. Der bGZ-Salzbeton wurde im ERAM als Nachfolger für den Salzbeton M2 eingesetzt, da die zur Herstellung benötigte Steinkohlenflugasche nicht mehr verfügbar war. Zum bGZ-Beton liegen keine so detaillierten Informationen vor wie zum Salzbeton M2 weswegen dieser bei der Betrachtung der Schwindprozesse des Salzbetons als repräsentatives Vergleichsmaterial betrachtet wird. Es lässt sich festhalten, dass sowohl der Magnesiabinder MB10 als auch der bGZ-Salzbeton bereits großmaßstäblich zur Herstellung von Streckenverschlüssen oder Forschungsbauwerken verwendet wurden und sich dabei als geeignete Baumaterialien herausgestellt haben. Die verwendeten Rezepturen wurden in Kapitel „3.3.2 Baustoff des Streckenverschlussbauwerks“ näher vorgestellt.

## 6.2 Laboratives verfahren zur Erzeugung einer Kontaktfuge

Die Herstellung der künstlichen Kontaktfuge erfolgte durch die Schädigung der Proben im Kontaktbereich zwischen Magnesiabinder beziehungsweise Salzbeton und Salz im Spaltzugversuch. Im Spaltzugversuch wird die zylindrische Probe in eine Druckprüfmaschine eingespannt (Abb. 33).

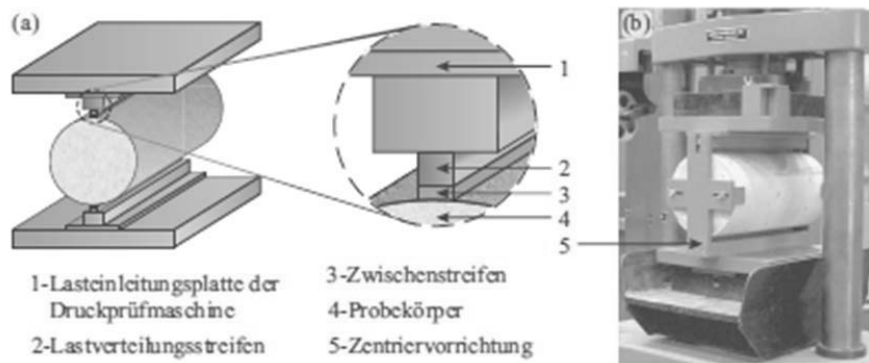


Abb. 33: Schematische Darstellung des Spaltzugversuchs nach DIN EN 12390-6 [95]

Durch die Ausübung einer Kraft auf die Probe durch die beiden Lasteinleitungsplatten wurden im Zentralteil der Probe Zugspannungen induziert, die wie in Abb. 34 dargestellt zu einem Versagen der Probe senkrecht zu den Lasteintragsplatten führt. Die Probekörper wurden so in die Apparatur eingebaut, dass der Kontaktbereich zwischen Beton und Salz senkrecht zu den Lasteinleitungsplatten liegt und der sich wie in Abb. 34 dargestellt ausbildende Riss entlang des Kontaktbereichs zwischen Salz und Beton verläuft.

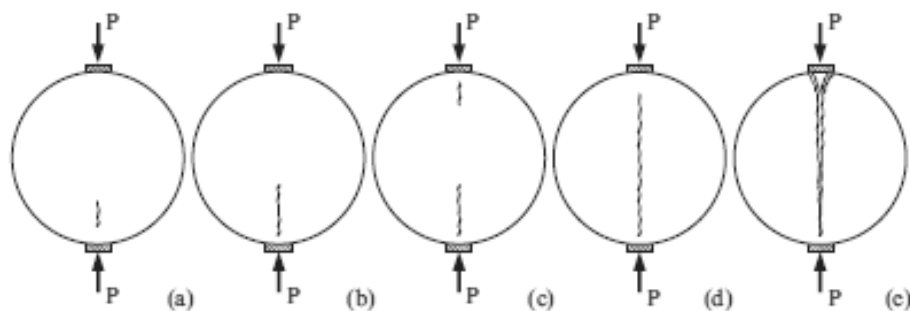


Abb. 34: Rissentwicklung im Spaltzugversuch nach Castro-Montero[96]

An einer der beiden Stirnseiten der Probe wurde senkrecht zum Kontaktbereich zwischen Salz und Beton ein digitaler Messschieber angebracht, mit dem während des Spaltzugversuchs die Öffnung des Risses an der Stirnseite überwacht werden konnte. Der Spaltzugversuch wurde abgebrochen, sobald auf dem Messschieber eine Öffnungsweite von 150  $\mu\text{m}$  zu erkennen war.

Wichtig bei der Durchführung des Spaltzugversuchs war der Zeitpunkt der Durchführung in Bezug auf das Betonalter. Mit zunehmender Abbindezeit erhöht sich die Festigkeit des Betons als auch dessen Steifigkeit, wodurch die Beschaffenheit der im Spaltzugversuch erzeugten Bruchfläche beeinflusst wird. Die Oberflächenbeschaffenheit wiederum beeinflusst das Eindringverhalten von Injektionsmitteln entlang der Kontaktfuge. Daher gibt es eine deutliche Beeinflussung der Beschaffenheit der gebildeten Kontaktfuge durch den Zeitpunkt der Kontaktfugenbildung. Um den Zeitpunkt der Durchführung des Spaltzugversuchs zu ermitteln, wurden Materialkennwerte des Salzbetons M2 verwendet, da dieser umfangreich parametrisiert wurde.

Wie in Abb. 35 zu erkennen ist, tritt das höchste Schwindmaß im Salzbeton M2 während der ersten 40 Tage der Abbindezeit auf. Innerhalb dieser Zeit kommt es auch zu einem deutlichen Anstieg der Haftzugfestigkeit des Kontaktbereichs zwischen dem Salz der Streckenkontur und dem Salzbeton. Durch das Schwinden des Salzbetons kommt es im Kontaktbereich zum Aufbau von Zugspannungen,

die beim Überschreiten der Haftzugfestigkeit zur Bildung der Kontaktfuge führen. Da in der Literatur keine Informationen zu dem Zeitpunkt der Kontaktfugenbildung verfügbar sind, müssen hierzu Annahmen getroffen werden, um den Spaltzugversuch durchführen zu können. Da die Haftzugfestigkeit des Kontaktbereichs nach 14 Tagen Abbindezeit mit Abstand den niedrigsten Wert hat, zu diesem Zeitpunkt jedoch schon mehr als 50 % der Schwindenverformung im Beton aufgetreten sind, sollen die Spaltzugversuche zu diesem Zeitpunkt durchgeführt werden, da hier infolge des hohen Schwindverhaltens und der noch relativ geringen Haftzugfestigkeit im Vergleich zu späteren Zeitpunkten eine vergleichsweise geringe Zugspannung benötigt wird um die Bildung der Kontaktfuge zu ermöglichen.

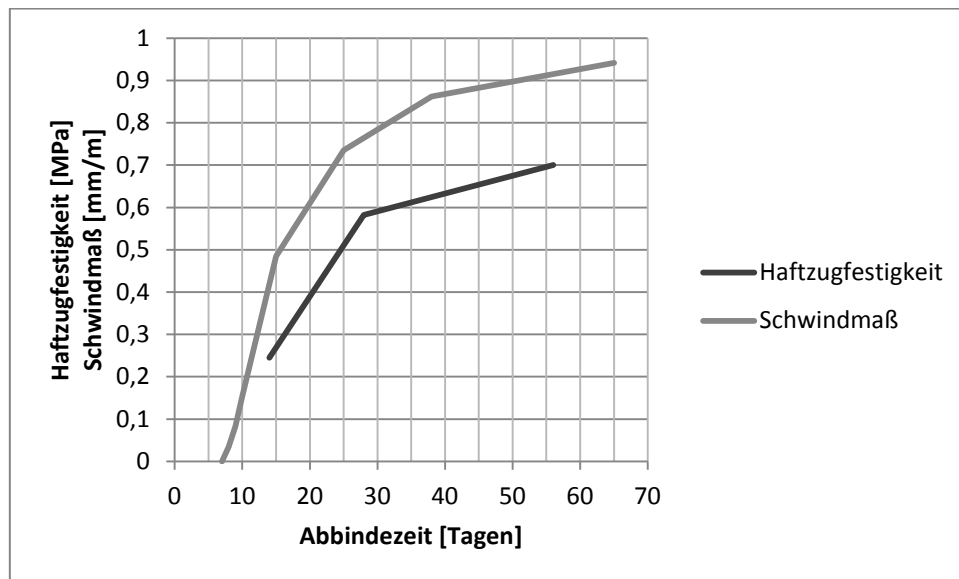


Abb. 35: Entwicklung der Haftzugfestigkeit zwischen dem Salzbeton M2 und Steinsalz und dem Schwindmaß des Salzbetons M2 in Abhängigkeit von der Abbindezeit. Die Daten die der Abbildung zugrunde liegen wurden den Planungsunterlagen zur Stilllegung des Endlagers Morsleben entnommen[26; 28].

Vorversuche zeigten, dass Proben des Salzbetons M2 nach einer Abbindedauer von 14 Tagen bei einer Raumtemperatur zwischen 20 und 25°C im Spaltzugversuch geschädigt werden können und es hierbei zur Trennung von Salz und Salzbeton kommt. Abb. 36 zeigt Aufnahmen der erzeugten Kontaktfuge. Zu erkennen ist eine scharfe Trennung der beiden Baustoffe. Die zwischen dem Salzbeton (in den Aufnahmen links oben) und dem Steinsalz befindliche Kontaktfuge ist in den beiden Aufnahmen mit dem bei der Präparation der Proben zur Stabilisierung verwendeten Harz Araldite gefüllt. Für den Magnesiabeton MB10 liegen keine Informationen über die Entwicklung der Haftzugfestigkeit und des Schwindmaßes in Abhängigkeit der Abbindezeit vor. Erste Versuche mit Abbindezeiten von 14 Tagen wie beim Salzbeton M2 zeigten, dass die Schädigung im Spaltzugversuch sehr abrupt auftrat, sich Risse im Kontaktbereich mit Öffnungsweiten von mehreren Hundert  $\mu\text{m}$  bildeten. Um die Öffnung der künstlichen Kontaktfuge an der Stirnseite messen zu können wurden daher Probenkörper mit kürzeren Abbindezeiten hergestellt. Bei Probenkörpern mit einer Abbindezeit von 5 Tagen ließ sich ein kontinuierlicher Anstieg der Öffnungsweite der künstlichen Kontaktfuge messen. Daher wurde, um Probenkörper mit einer definierten Öffnungsweite der Kontaktfuge von 150  $\mu\text{m}$  herstellen zu können, beim Salzbeton M2 eine Abbindezeit von 14 Tagen und beim Sorelbeton MB10 von 5 Tagen für die Spaltzugversuche gewählt.

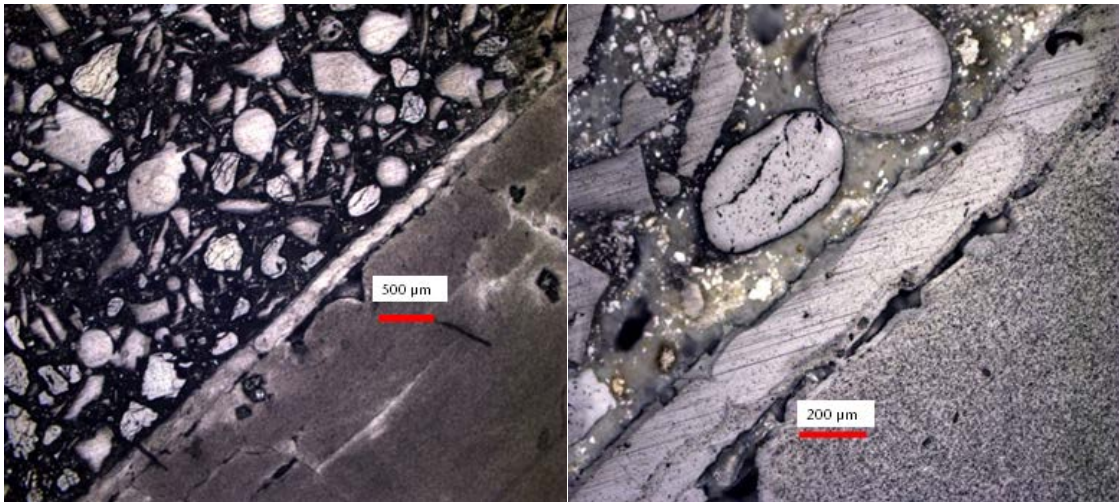


Abb. 36: Auflichtmikroskopie des im Spaltzugversuch geschädigten Kontaktbereichs zwischen Salzbeton M2 und Steinsalz. Beide Aufnahmen zeigen den gleichen Schliff in unterschiedlicher Vergrößerung. Links Oben ist der Salzbeton und rechts unten das Steinsalz. Die diagonal durch das Bild verlaufende Zone dazwischen ist die hergestellte Kontaktfuge.

Im weiteren Verlauf wurden jeweils 8 Probenkörper aus Salzbeton und Magnesiabinder im Spaltzugversuch geschädigt. Während der Spaltzugversuche wurde mittels eines auf der Stirnseite der Probe befestigten Messschiebers die Öffnungsweite des sich bildenden Risses erfasst und sobald 150 µm erreicht waren wurde der Spaltzugversuch abgebrochen. Die Spaltzugversuche wurden bei einer Zunahme des Axialdrucks von 0,005 MPa pro Sekunde durchgeführt.

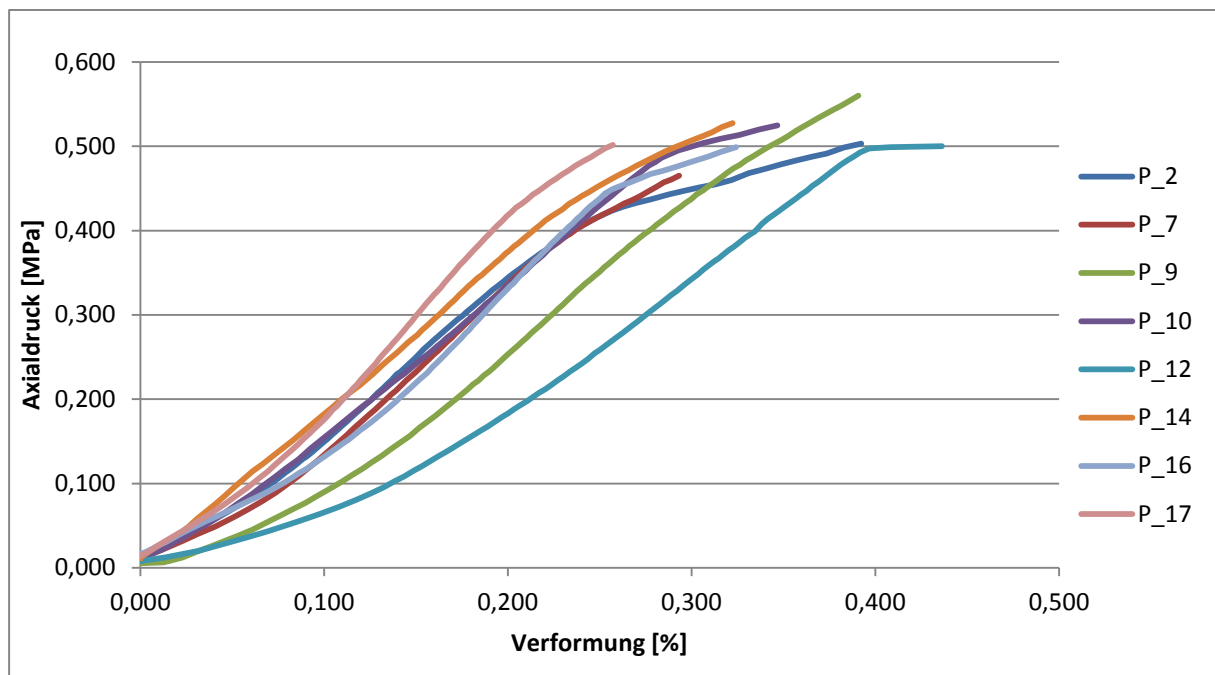


Abb. 37: Axialdruck gegen Verformung für den bGZ-Salzbeton.



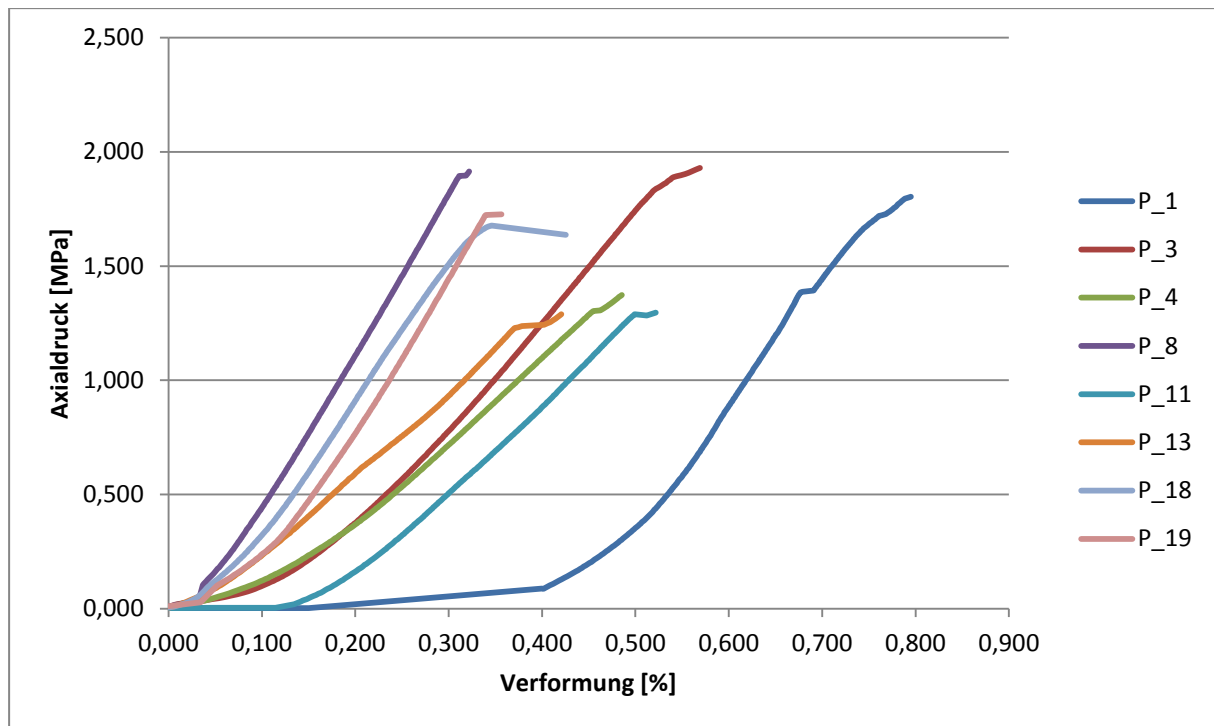


Abb. 38: Axialdruck gegen Verformung für den Magnesiabinder MB10.

Die beiden verwendeten Betonsorten wiesen ein unterschiedliches Verhalten im Spaltzugversuch auf. Zur Veranschaulichung sind in Abb. 37 und Abb. 38 der Axialdruck sowie die Verformung der Probenkörper während des Spaltzugversuchs dargestellt. Zudem sind, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen, in Abb. 39 die Arbeitskennlinien der Spaltzugversuche mit dem Magnesiabinder und dem Salzbeton zusammen dargestellt. In allen drei Abbildungen wird die Axialspannung gegen die Verformung abgetragen. Die Axialspannung stellt die größte der drei Hauptspannungen während des Spaltzugversuchs dar. Je größer die Axialspannung, desto mehr Kraft ist notwendig, um ein Zugversagen des Probenkörpers im Spaltzugversuch zu erzeugen. Die Verformung gibt an, um wie viel Prozent sich der Probendurchmesser parallel zur Richtung der Axialkraft, also parallel zur sich ausbildenden Kontaktfuge verringert.

In Abb. 39 lässt sich gut erkennen, dass die Probenkörper aus Magnesiabinder und Salzbeton sehr unterschiedliche Materialverhalten beim Spaltzugversuch aufweisen. Mit ungefähr 0,5 MPa ist der maximale Axialdruck bei den Spaltzugversuchen mit dem Salzbeton M2 deutlich niedriger als beim Magnesiabinder MB10, der Spitzenwerte von fast 2 MPa erreicht. Die Verformung zum Ende des Spaltzugversuchs beträgt beim Magnesiabinder zwischen 0,3 und 0,5 % (der Probenkörper P\_1 stellt mit ca. 0,8 % einen Ausreißerwert dar). Beim Salzbeton liegt die maximale Verformung zwischen 0,25 und 0,4 %. Auffällig ist zudem, dass die Arbeitskennlinien bei den mit Salzbeton hergestellten Probenkörpern eine weniger ausgeprägte Streuung aufweisen als die Probenkörper die mit Magnesiabinder hergestellt wurden.

Einen weiteren Unterschied zwischen beiden Materialien stellt die Änderung des Spannungs-Verformungs-Verlaufs mit zunehmender Verformung dar. Beide Materialien weisen zwar gegen Ende des Spaltzugversuchs eine Veränderung des Verhältnisses zwischen Axialdruck und Verformung auf. Eine Reduktion des Verhältnisses bedeutet, dass es zu einer Zunahme der Verformung des Probenkörpers kommt, da die Spaltzugversuche bei einer gleichbleibenden Zunahme des Axialdrucks

(Spannungsgeregelt) durchgeführt wurden. Beim Salzbeton zeigt der Kennlinienverlauf zum Ende des Spaltzugversuchs einen degressiven Verlauf, wobei der Übergang zwischen den beiden Kennlinienverläufen graduell ist. Beim Magnesiabinder zeigen die Messwerte ebenfalls im Versuchsende jedoch über einen wesentlich kürzeren Zeitraum und mit einem deutlichen Übergang zum vorherigen tendentiell linear elastischen Spannungs-Verformungs-Verlauf.

Diese Beobachtung ist auf ein unterschiedliches Bruchverhalten der Probenkörper bei der Öffnung der künstlichen Kontaktfuge zurückzuführen. Bei den mit Salzbeton hergestellten Probenkörpern tritt während der Schlussphase des Spaltzugversuchs über einen längeren bei weiter steigendem Axialdruck eine kontinuierliche Zunahme der Verformung, bzw. der Öffnung der Kontaktfuge auf. Beim Magnesiabinder ist die Spannungs-Verformungs-Kennlinie in der Schlussphase des Spaltzugversuchs wesentlich flacher als beim Salzbeton, die Kontaktfugenbildung läuft wesentlich abrupter ab als beim Salzbeton.

Die Probenkörper, die mit dem Salzbeton M2 hergestellt wurden, wiesen zum Zeitpunkt der Spaltzugversuchs (14 Tage Abbindezeit) eine deutlich geringere Festigkeit auf als die mit Magnesiabinder hergestellten Probenkörper (5 Tage Abbindezeit). Zudem weisen die Salzbeton Probenkörper ein plastischeres Deformationsverhalten bei der Kontaktfugenbildung auf als der Magnesiabinder.

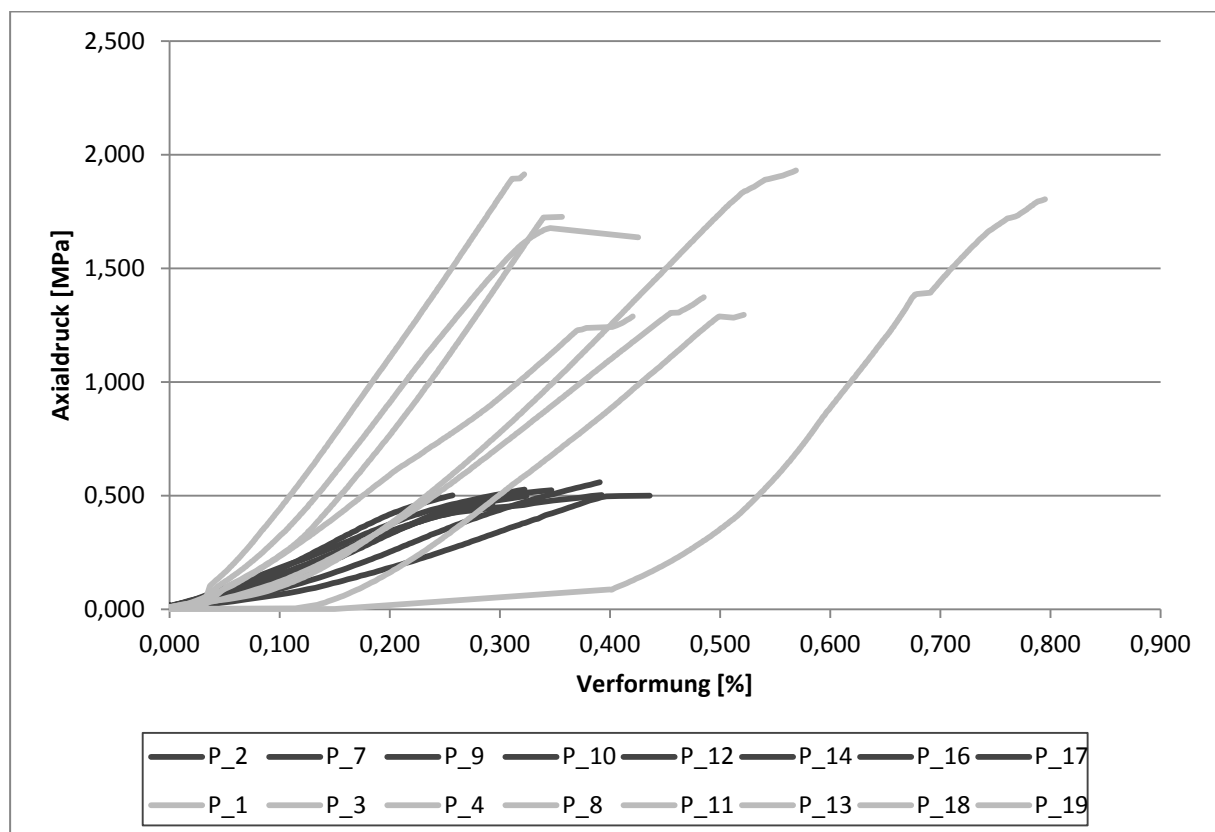


Abb. 39: Axialdruck gegen Verformung für alle durchgeführten Spaltzugversuche (grün bGZ-Salzbeton und rot Magnesiabinder MB10)

## **6.3 Injektion der Kontaktfuge**

Nach der Erzeugung der künstlichen Kontaktfuge im Spaltzugversuch wurden die Probenkörper mit Beton ummantelt, um ein Zerbrechen durch den Injektionsdruck zu verhindern. Hierzu wurden die Probenkörper in ein Kg-Rohr mit einem Innendurchmesser von 225 mm einbetoniert. Um einen Feuchtigkeitseintrag aus dem Beton in den Probenkörper zu unterbinden wurden die Probenkörper vor der Betonage mit dem Epoxidharz Denepox 40 beschichtet.

### **6.3.1 Durchführung der Injektion**

Die im Spaltzugversuch erzeugte künstliche Kontaktfuge wurde über eine im Kontaktbereich zwischen Salz und Beton vor der Betonage verlegte Injektionsleitung injiziert. Hierfür wurde die Injektionsleitung Intec Cem N der Firma Max Frank verwendet, die bereits im Forschungsvorhaben CARLA zur Injektion des Kontaktbereichs eines In-Situ Streckenverschlussbauwerks zum Einsatz kam. Für die Durchführung der Injektion wurden auf beiden Stirnseiten des Probenkörpers Schraubpacker der Firma Desoi jeweils 5 cm weit in die Injektionsleitung eingeschraubt. Auf beiden Schraubpackern wurde nachfolgend ein Anschlussstück für die Injektionspumpe (HP-60ZD) auf die Packer arretiert. Neben dem Anschließen der Injektionspumpe dient das Anschlussstück auch dazu, nach dem Entlüften der Leitung (auf der pumpenabgewandten Seite) sowie nach Ablauf der Injektion (auf der Pumpenseite) die Injektionsleitung abzuschleubern. Durch das Abschiebern wird der Injektionsdruck für die Aushärtephase aufrechterhalten.

Nach dem Entlüften der Injektionsleitungen wurde bei allen Injektionen ein Druck von 5 bar aufgebaut und über einen Zeitraum von 20 Minuten aufrechterhalten. Durch das Abschiebern des Packers nach der Injektion wurde der Injektionsdruck auch für die Aushärtephase aufrechterhalten.

### **6.3.2 Auswertung**

Die Probenkörper wurden vor und nach der Injektion gewogen, wobei die Differenz der beiden Wägungen die Masse des insgesamt injizierten Injektionsmittels repräsentiert. Hiervon wird zunächst das in der Injektionsleitung sowie im Packer verbleibende Injektionsmittel abgezogen. Anschließend wird mit Hilfe der Dichte der Injektionsmaterialien das in den Probenkörper injizierte Volumen berechnet. Da die Probenkörper unterschiedliche Längen aufweisen werden die injizierten Mengen zur besseren Vergleichbarkeit in  $\text{cm}^3$  Injektionsmittel pro cm Länge des Salzkerns angegeben. In Abb. 40 sind die pro cm Leitungslänge injizierten Volumina der unterschiedlichen Injektionsmittel (Wasserglas 37/40 und Ultrafin 12) und Baustoffkombinationen (Magnesiabinder MB10 und bGZ-Salzbeton) dargestellt. Für jede Kombination aus den Injektionsmitteln wurde eine separate Signatur verwendet.



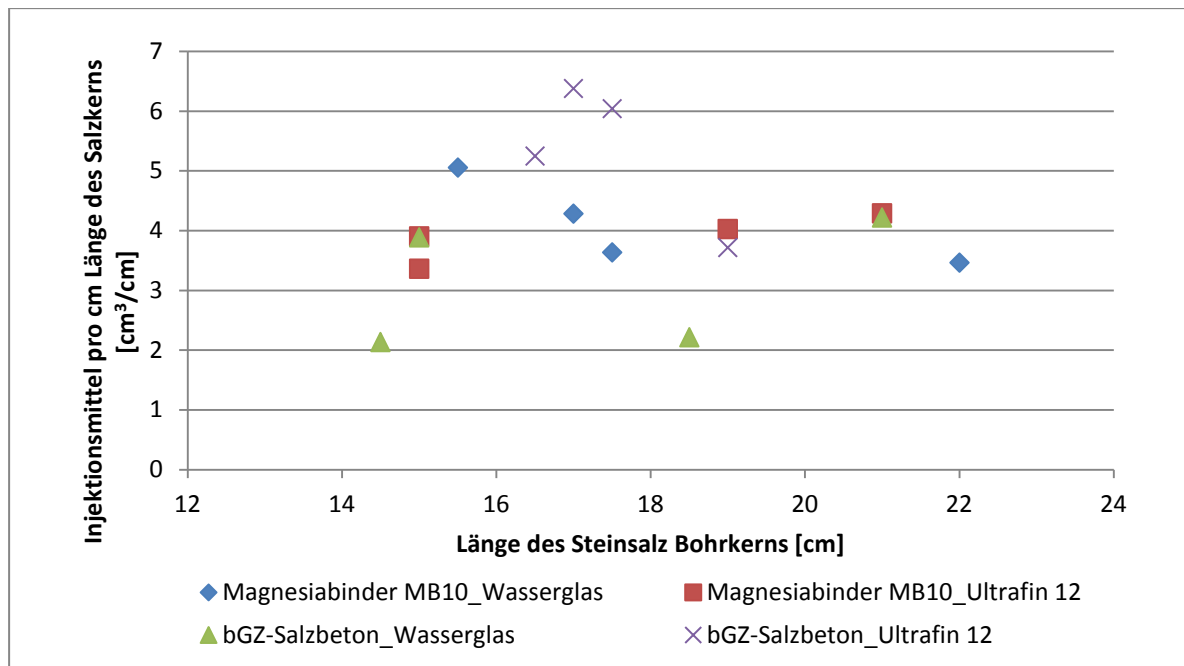


Abb. 40: Zusammenstellung der injizierten Mengen an Ultrafin 12 (UF) und Wasserglas (WG) in Abhängigkeit von der Länge der Injektionsleitung. Die unterschiedlichen Kombinationen aus dem Beton des Probenkörpers sowie den eingesetzten Injektionsmitteln sind unterschiedlich gekennzeichnet.

In Abb. 40 ist zu erkennen, dass die Länge des Probenkörpers (bzw. des zur Herstellung des Probenkörpers verwendeten Steinsalzbohrkerns) keinen Einfluss auf das injizierte Volumen hat. Vielmehr hat die Kombination aus Injektionsmittel und Baustoff des Probenkörpers einen Einfluss auf das injizierte Volumen. Im Durchschnitt wurde in alle Probenkörper  $4,23 \text{ cm}^3$  pro cm Leitungslänge injiziert. In Tab. 21 sind die Mittelwerte der 4 verschiedenen injizierten Materialkombinationen aus Injektionsmittel und Baustoff des Streckenverschlussbauwerks zusammengestellt. Hierbei ist ersichtlich, dass mehr Ultrafin 12 als Wasserglas in die Probenkörper injiziert werden konnte und sich die mit dem bGZ-Salzbeton hergestellten Probenkörper besser als die mit dem Magnesiabinder hergestellten injizieren ließen. Zudem ist erkennbar, dass es deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Materialkombinationen hinsichtlich des Eindringverhaltens der Injektionsmittel gibt. Dies zeigt sich insbesondere bei den mit dem bGZ-Salzbeton hergestellten Probenkörpern, da im Schnitt nur  $3,41 \text{ cm}^3$  Wasserglas und  $5,35 \text{ cm}^3$  Ultrafin 12 injiziert werden konnten. Um mehr Informationen hinsichtlich des Ausbreitverhaltens der Injektionsmittel in den Probenkörpern zu erhalten, wurden diese nach einer Aushärtphase der Injektionsmittel von mehreren Wochen zersägt und optisch bewertet.

Tab. 21: Übersicht der pro cm des Salzkerns injizierten Volumina des jeweiligen Injektionsmittels und prozentuale Abweichung gegenüber des Mittelwerts aller Versuchsinjektionen.

	Ø Gesamt	Ø bGZ-Salzbeton	Ø Sorelbeton MB10	Ø Ultrafin 12	Ø Wasserglas 37/40
Menge [cm <sup>3</sup> ]	4,23	4,52	4,00	4,62	3,81
Verhältnis zum Ø Gesamt [%]	100,0	106,7	94,5	109,1	90,1
	Ø Gesamt	Ø bGZ/Wg	Ø bGZ/UF	Ø MB10/Wg	Ø MB10/UF
Menge [cm <sup>3</sup> ]	4,23	3,41	5,35	4,11	3,90
Verhältnis zum Ø Gesamt [%]	100,0	80,6	126,5	97,2	92,2

## 6.4 Analyse des Injektionserfolgs

Neben der Auswertung der in die jeweiligen Probenkörper injizierten Menge an Injektionsmittel wurden die Probenkörper nach einer Aushärtephase aufgesägt, um das Ausbreitverhalten des Injektionsmittels im Probenkörper betrachten zu können. Bei den mit Ultrafin 12 injizierten Probenkörpern betrug die Aushärtephase etwa einen Monat und bei den mit Wasserglas injizierten Proben wurde eine Aushärtephase von 3 Monaten eingehalten. Um die Schädigung der Probenkörper beim Spaltzugversuch als auch das Ausbreitverhalten des Injektionsmittels im geschädigten Bereich für die unterschiedlichen Kombinationen aus Injektionsmittel und dem Baustoff des Streckenverschlussbauwerks vergleichen zu können, wurde ein tabellarisches Auswerteverfahren erarbeitet, das es ermöglicht, die optischen Befunde bei der Betrachtung der einzelnen Schnitte durch die Probenkörper in Zahlen zu transferieren und somit einen Vergleich zu ermöglichen. Im Folgenden wird zuerst das Auswerteverfahren vorgestellt bevor auf die Ergebnisse der Auswertung eingegangen wird.

### 6.4.1 Verfahren zur Bewertung des Injektionserfolgs

Jeder Probenkörper wurde an drei verschiedenen Stellen zersägt, wobei alle drei Schnitte parallel zu den Stirnseiten der Probenkörper angeordnet sind (Abb. 41). Die Schraubpacker reichen von der Stirnseite 5 cm weit in den Probenkörper hinein. Daher wurden die Schnitte 1 und 3 in einer Entfernung von 7 cm zur Stirnseite angelegt um sicherzustellen, dass sich diese in einem Bereich befinden, wo das Injektionsmittel aus der Injektionsleitung in den Probenkörper austreten kann. Der Schnitt 2 wurde in der Mitte des Probenkörpers angeordnet.

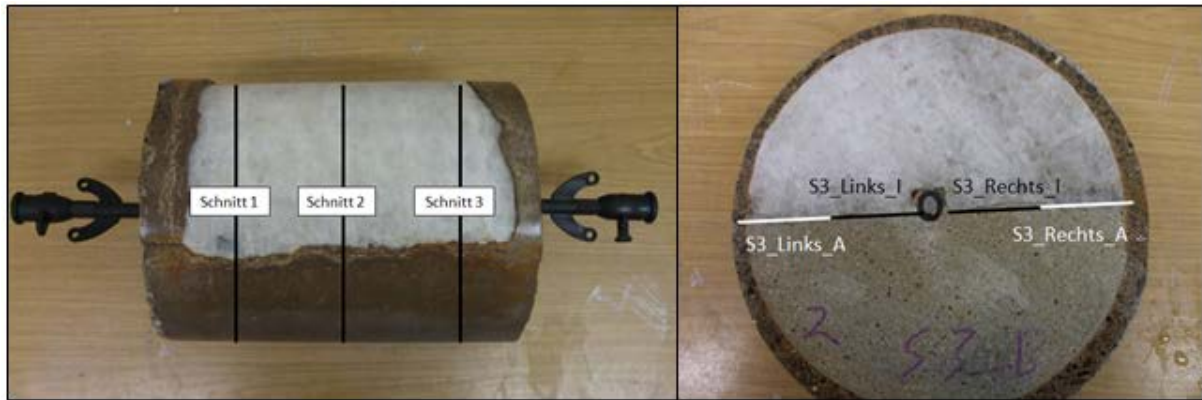


Abb. 41: Links: Übersichtsdarstellung eines Probenkörpers mit den beiden stirnseitig befestigten Schraubpackern und den 3 parallel zur Stirnseite angeordneten Schnitten. Rechts: Beispielhafte Darstellung der vier Abschnitte eines Schnittes die zur Auswertung herangezogen werden.

Um die Befunde der optischen Auswertung der Schnitte zusammenfassend darstellen zu können und einen Vergleich zwischen den unterschiedlichen Kombinationen aus Injektionsmittel und Salzbeton oder Magnesiabinder zu ermöglichen, wurde eine tabellarische Auswertung erarbeitet. Bei der Tabellarischen Auswertung werden drei verschiedene Aspekte betrachtet. Dies ist zum einen, wo es bei den Spaltzugversuchen zur Schädigung des Probenkörpers und zum Anderen, wie sich das Injektionsmittel in dem geschädigten Bereich verteilt hat. Zudem fiel bei der Betrachtung der Schnitte auf, dass bei vielen Probenkörpern auch innerhalb des Steinsalzes Injektionsmittel entweder entlang von Korngrenzen oder verteilt auf Rissen, die mehr oder weniger parallel zu den Schnittflächen verlaufen, eingedrungen ist. Auch die flächenmäßige Verteilung der injizierten Steinsalzbereiche wurde daher in das Auswertesystem aufgenommen. In Tab. 22 ist beispielhaft das Bewertungssystem für den mit Ultrafin 12 injizierten Probenkörper Nummer 2 dargestellt.

### Schnitt

Das tabellarische Auswertesystem wird im Folgenden am Beispiel des Probenkörpers Nr. 2 vorgestellt. Als erstes wird erläutert, wie die einzelnen Schnitte ausgewertet werden. Für jeden der drei Schnitte wurden 4 Abschnitte zur Auswertung herangezogen, wobei für jeden Abschnitt jeweils beide Seiten des Schnittes betrachtet und in der tabellarischen Auswertung zusammengefasst werden. Bei der Betrachtung der Schnitte fiel auf, dass Unterschiede in der Ausbildung des geschädigten Bereiches als auch der Ausbreitung des Injektionsmittels in dem Probenkörper sich mit zunehmenden Abstand zur Injektionsleitung unterscheiden können und auch innerhalb eines Schnittes von einer Seite zur anderen Unterschiede feststellbar sein können.

Tab. 22: Tabellarische Auswertung des mit Ultrafin 12 injizierten Probenkörpers Nummer 2.

Proben- körper	Schnitt	Lokalität der Schädigung				Injektionsmittel im geschädigten Bereich				Injektion des Salzes			
		Kein Riss	Riss entlang des Kontaktbereichs	Entfernung < 1 cm zum Kontaktbereich	Entfernung 1 bis 2 cm zum Kontaktbereich	Kat 1	Kat 2	Kat 3	Kat 4	Keine Injektion	< 1/6 der Fläche	1/6 bis 3/6 der Fläche	> 3/6 der Fläche
2	S1_Links_I				x				x				
	S1_Links_A				x				x				
	S1_Rechts_I				x				x				
	S1_Rechts_A			x				x					
	S2_Links_I		x					x					
	S2_Links_A			x			x						x
	S2_Rechts_I		x										
	S2_Rechts_A			x			x						
	S3_Links_I		x				x						
	S3_Links_A		x					x					
	S3_Rechts_I		x								x		
	S3_Rechts_A		x				x						

Daher wurde der Kontaktbereich jedes Schnittes in 4 Bereiche unterteilt, wie in Abb. 41 dargestellt. Jeweils zwei Bereiche liegen links oder rechts der Injektionsleitung, die weiter unterteilt werden in innen und außen. Der innere Bereich (I) auf jeder Seite verläuft von der Injektionsleitung 5 cm weit in Richtung des Randes der Probe wo der äußere Bereich (A) dann beginnt. Die Unterscheidung, ob sich der betrachtete Bereich rechts oder links der Injektionsleitung befindet ist relativ zu einer der beiden Stirnseiten des Probenkörpers. Die Unterscheidung erfolgte daher ausgehend von der Stirnseite beim Schnitt 1, wobei die Einteilung zwischen Links und rechts in Blickrichtung zur Stirnseite beim Schnitt 3 erfolgte.

#### Lokalität der Schädigung

Zur Auswertung der Schnitte wurden wie in Abb. 42 zu erkennen 4 verschiedene Zustände herangezogen. Im ersten Schritt wurde der an den Bohrkernen anhaftende Staub entfernt und die Betrachtung fand im trockenen Zustand statt (In Abb. 42 Links unten dargestellt). Im zweiten Schritt wurden die Schnitte mit einem Pinsel befeuchtet, wobei kleinste Staubreste sowie Ausblühungen entfernt wurden (die drei weiteren Darstellungen in Abb. 42). Diese führt zu einer deutlichen Verbesserung der Detailschärfe und ermöglicht das Erkennen selbst feinsten Schädigungen und injizierter Bereiche. Bei einigen Proben waren Ausblühungen zu erkennen (Abb. 42 links unten). Ausblühungen entstehen durch das Austreten von Lösungen aus dem Schnitt, die dann an der Luft verdunsten und ein weißes Kristallinat aus Salz zurücklassen. Somit zeigen die Kristallinate an, wo Wegsamkeiten in den Proben vorhanden sind und da die Lösungen ihren Ursprung in den Injektionsmitteln haben befinden sich die Kristallinate im Nahbereich injizierter Wegsamkeiten. Das Wasserglas gibt beim Erhärtungsprozess Synäreselösung ab und Ultrafin 12 neigt im geringen Umfang zur Bildung von Überstandslösung. Diese Lösungen sind in den Proben entlang vorhandener Wegsamkeiten eingeschlossen und können nach dem Sägen der Schnitte an die Oberfläche gelangen und die in den Lösungen enthaltenen Salze kristallisieren dort aus. Um geschädigte sowie nur im geringen Umfang injizierte Bereiche in den Proben erkennen zu können, war es hilfreich, zuerst die trockenen Schnitte zu begutachten und nachfolgend im Bereich vorhandener Ausblühungen die befeuchteten Proben näher zu betrachten.

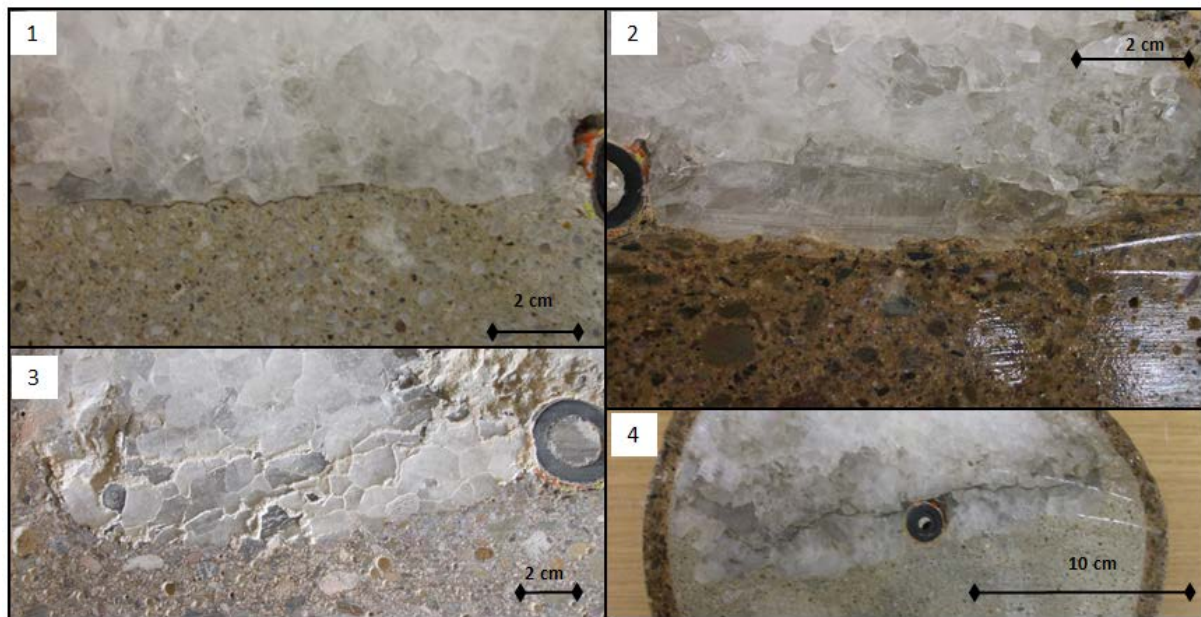


Abb. 42: Unterschiedliche Schädigungen des Kontaktbereichs. Oben Links: Schädigung in Form eines Risses entlang des Kontaktbereiches. Oben Rechts Riss im Salz von der Injektionsleitung nach außen auf den Kontaktbereich zulaufend. Unten Links: Rissnetzwerk parallel zum Kontaktbereich im Steinsalz mit bis zu 2 cm Entfernung zum Kontaktbereich. Unten Rechts: Schädigung des Probenkörpers beim Spaltzugversuch in Form eines Risses im Salz parallel zum Kontaktbereich.

Im Rahmen der Auswertung der Schnitte wurde zuerst der Kontaktbereich zwischen dem Steinsalz und dem Salz- oder Magnesiabinder betrachtet um zu erkennen, an welcher Stelle der Probenkörper im Spaltzugversuch geschädigt wurde. Hierbei gibt es unterschiedliche Schädigungsbilder, die in Abb. 42 beispielhaft dargestellt sind. Bei der Betrachtung der Schädigung der Probenkörper fiel auf, dass in einzelnen Proben keine Schädigung zu erkennen war. In den Probenkörpern bei denen eine Schädigung im Kontaktbereich zwischen Steinsalz und dem Baustoff des Streckenverschlusses sichtbar war, trat diese entweder direkt entlang des Kontaktbereichs oder parallel zum Kontaktbereich im Salz mit einem Abstand von bis zu 2 cm zum Kontaktbereich auf. Bei der Auswertung wurde zwischen Proben unterschieden, die keine sichtbare Schädigung aufwiesen, Schädigungen im Kontaktbereich sowie Schädigungen im Salz mit Abständen unter 1 cm zum Kontaktbereich sowie mit 1 bis 2 cm Entfernung zum Kontaktbereich.

#### Injektionsmittel im geschädigten Bereich:

Anschließend an die Beschreibung der Lage der geschädigten Bereiche wurden diese hinsichtlich vorhandenen Injektionsmittels untersucht. Um eine Auswertung wie in Tab. 22 zu ermöglichen wurden die Mengen an Injektionsmittel die im geschädigten Bereich zu erkennen sind in vier verschiedene Kategorien unterteilt. Diese sind zusammenfassend in Abb. 43 dargestellt.



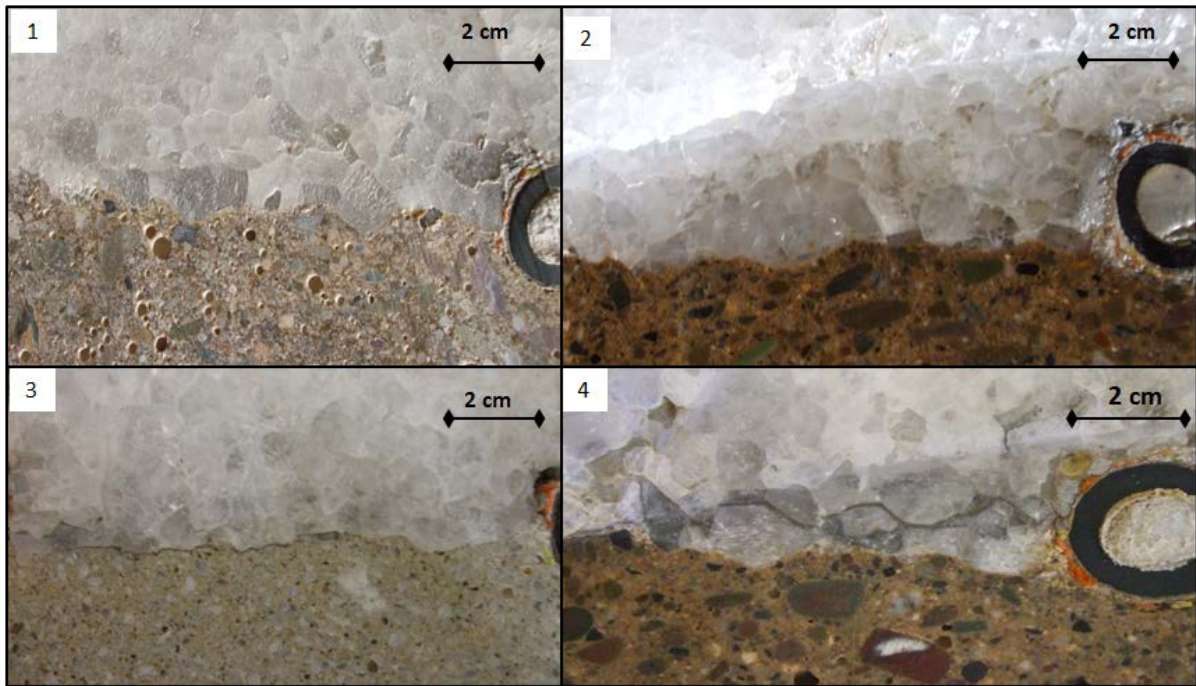


Abb. 43: Vier Kategorien zur Auswertung des im Kontaktbereich vorhandenen Injektionsmittels. Oben Links: Kategorie 1. Oben Rechts: Kategorie 2. Unten Links: Kategorie 3. Unten Rechts: Kategorie 4.

Zur Kategorie 1 werden Proben gezählt, in denen kein Injektionsmittel erkennbar ist, jedoch können vereinzelt Ausblühungen auf der Probenoberfläche sichtbar sein. Kategorie 2 umfasst Proben bei denen im Geschädigten Bereich sehr schmale Risse oder Bereiche entlang von Korngrenzen zwischen einzelnen Steinsalzkrystallen mit geringen Öffnungsweiten vorhanden sind, die nur lokal und/oder nur mit geringen Mengen an Injektionsmittel gefüllt sind. Bereiche die zur Kategorie 3 gezählt werden weisen deutlich sichtbare mit Injektionsmittel gefüllte Bereiche auf. Diese sind zudem meist kontinuierlich gefüllt, können jedoch hinsichtlich der Öffnungsweite und der Menge an Injektionsmittel variieren. Zur Kategorie 4 werden geschädigte Bereiche gezählt, die kontinuierlich und deutlich sichtbar mit Injektionsmittel gefüllt sind, wobei die Breite der mit Injektionsmittel gefüllten Bereiche einen Millimeter überschreitet.

#### Injektion des Salzes:

Die Schädigung der Probenkörper erfolgte oftmals nicht direkt entlang des Kontaktbereichs, sondern parallel zu diesem im Salz mit einem geringen Abstand zum Kontaktbereich. Über diese mit Injektionsmittel gefüllten Bereiche mit einer Entfernung von bis zu 2 cm zum Kontaktbereich waren auch in vielen Proben mit Injektionsmittel gefüllte Bereiche in größerer Entfernung zum Kontaktbereich, die nicht parallel zu diesem verlaufen, sichtbar. Hier trat das Injektionsmittel entweder entlang der Korngrenzen des Salzes oder konzentriert entlang von flächigen, rissartigen Strukturen die annähernd parallel zu den Stirnseiten des Probenkörpers verlaufen auf. In Abb. 44 sind diese beiden Fälle beispielhaft dargestellt.

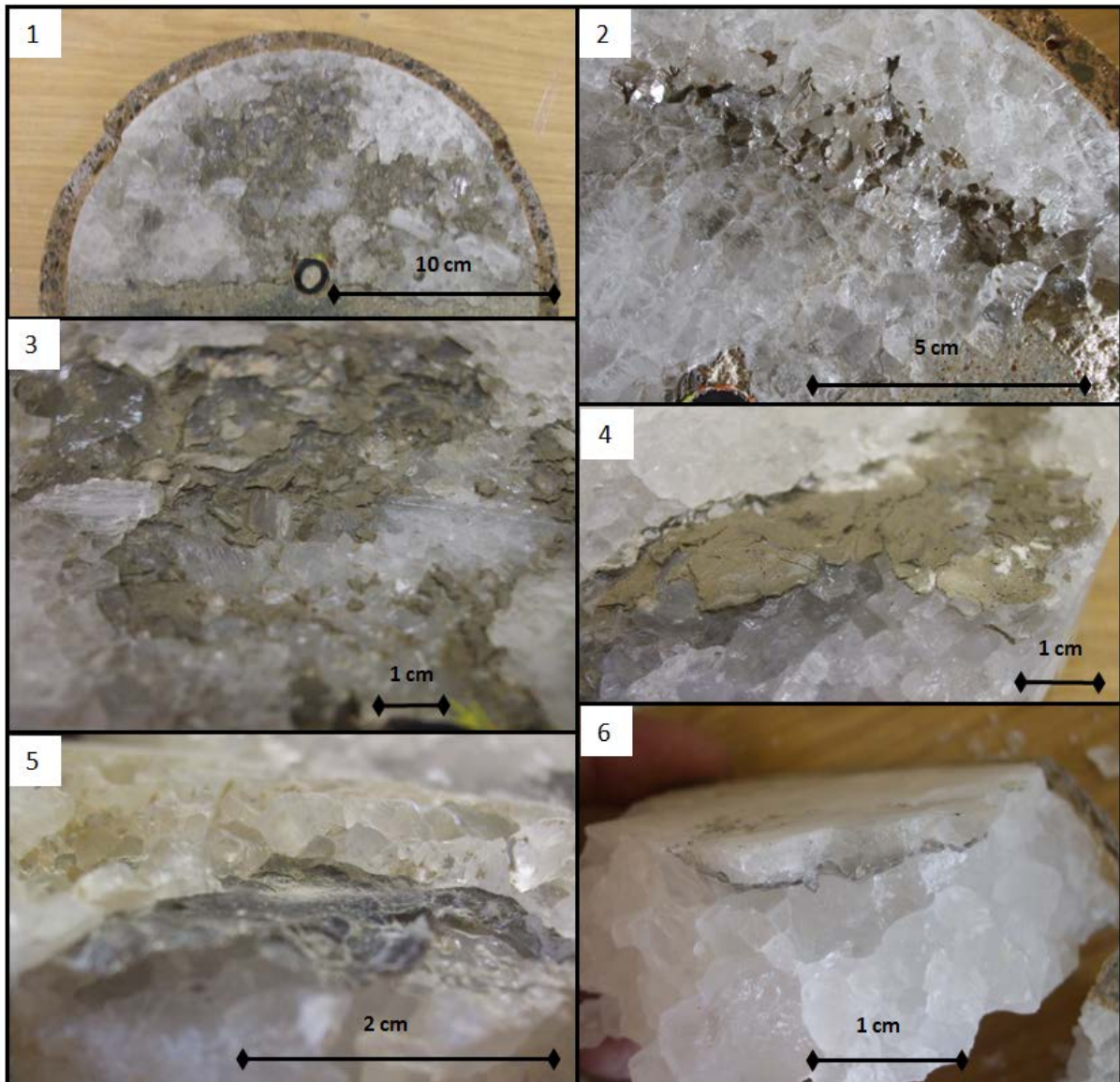


Abb. 44: 1: Schnitt durch einen Probenkörper bei dem das Steinsalz großflächig mit Ultrafin 12 injiziert wurde. 2: Ultrafin 12 entlang von Korngrenzen zwischen einzelnen Steinsalzkristallen. 3 und 4: Flächig, rissartige mit Ultrafin 12 injizierte Strukturen im Steinsalz. 5 und 6: Flächige, rissartige mit Wasserglas 37/40 injizierte Struktur im Steinsalz.

Die Fläche des Steinsalzes, die injiziert wurde, ist sehr unterschiedlich und reicht von einzelnen, wenige Quadratzentimeter großen Flächen bis zu großflächigen und fast vollständig injizierten Steinsalzbereichen. Daher werden für die Auswertung drei unterschiedliche Fälle unterschieden. Dies sind Proben bei denen unter 1/6 der Fläche des Salzes Injektionsmittel aufweist, Proben bei denen zwischen 1/6 und 3/6 injiziert wurden und Proben die flächenmäßig zu über 3/6 injiziert wurden. Die injizierten Bereiche im Salz sind unabhängig von Ihrer Größe meist parallel zu den Stirnseiten der Probenkörper orientiert und weisen nur eine geringe axiale Erstreckung auf.

#### 6.4.2 Optische und messtechnische Analyse des Injektionsergebnisses

Die einzelnen Schnitte durch die Probenkörper wurden tabellarisch ausgewertet, wobei sowohl die Schädigung der Probenkörper als auch die Ausbreitung des Injektionsmittels betrachtet wurde. Die einzelnen Tabellen sind im Anhang getrennt nach den vier verschiedenen Materialkombinationen



(jeweils zwei Injektionsmittel und zwei Baustoffe für das Streckenverschlussbauwerk) zusammengestellt. Zur Veranschaulichung der Injektionsergebnisse werden die in den einzelnen Tabellen festgehaltenen Verteilungen der Injektionsmaterialien in Kreisdiagrammen dargestellt. Diese Darstellungsweise wurde gewählt, da sie einen guten Vergleich des unterschiedlichen Verhaltens der vier Materialkombinationen bei den Injektionsversuchen ermöglicht. Die Kreisdiagramme geben die prozentuale Verteilung der in der tabellarischen Auswertung für die jeweilige Materialkombination aufsummierten Verteilungen innerhalb der unterschiedlichen Kategorien.

#### Lokalität der Schädigung:

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Analogie zur Auswertung der Einzelproben in Tab. 22 beginnend mit Kategorie „Lokalität der Schädigung“ der Probenkörper im Spaltzugversuch. In Abb. 45 ist die Lokalität der Schädigung der Proben für die vier verschiedenen Materialkombinationen dargestellt.

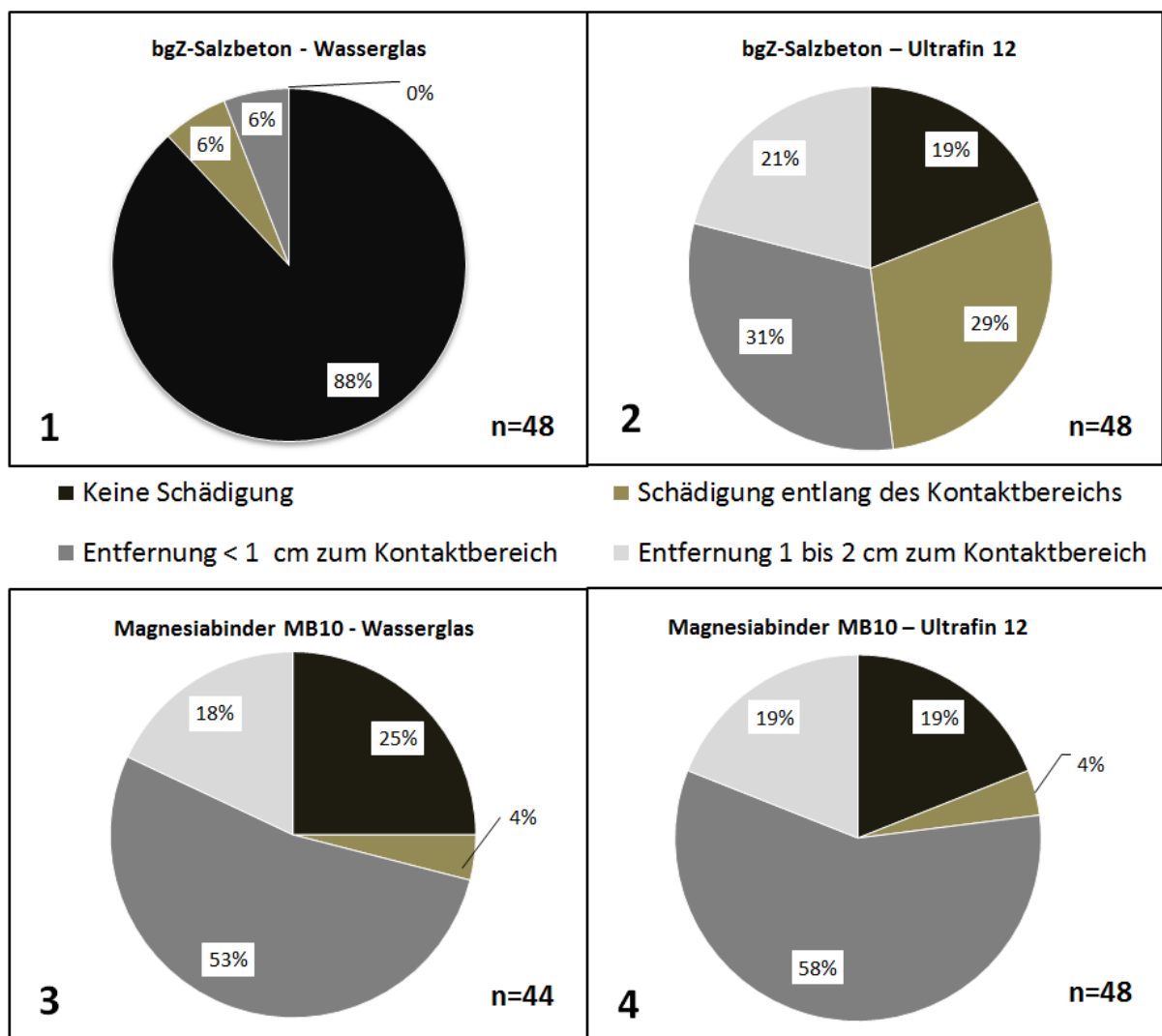


Abb. 45: Lage des durch den Spaltzugversuch geschädigten Bereichs in den Probenkörpern für die 4 Materialkombinationen. Diagramm 1: bgZ-Salzbeton und Wasserglas. Diagramm 2: bgZ-Salzbeton und Ultrafin 12. Diagramm 3: Magnesiabinder MB10 und Wasserglas Diagramm 4: Magnesiabinder MB10 und Ultrafin 12.

Die mit dem Magnesiabinder MB10 hergestellten Probenkörper weisen bei beiden verwendeten Injektionsmitteln eine ähnliche Verteilung der Lage des geschädigten Bereichs auf. Bei 20 bis 25 % der Proben war keine Schädigung feststellbar und mit 71 bzw. 77 % wurden die Magnesiabinderproben beim Spaltzugversuch überwiegend im Salz geschädigt. Dahingegen unterscheiden sich die Salzbetonprobenkörper deutlich voneinander. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass in 88 % der mit dem Wasserglas injizierten Probenkörper optisch keine Schädigung durch den Spaltzugversuch erkennbar ist. Beim Vergleich der mit Ultrafin 12 injizierten Salzbeton Probenkörper mit denen aus Magnesiabinder fällt auf, dass diese sich hinsichtlich des Schädigungsbildes unterscheiden. Beim Salzbeton sind alle vier Kategorien der Schädigung annähernd gleich häufig vertreten. Die Bereiche ohne sichtbare Schädigung und mit einer Schädigung in einer Entfernung von 1 bis 2 cm zum Kontaktbereich sind beim Salzbeton und Magnesiabinder vergleichbar. Jedoch weisen die Salzbetonprobenkörper mit 29 % wesentlich häufiger eine Schädigung entlang des Kontaktbereichs zwischen Salz und dem Salzbeton auf.

#### Injektionsmittel im geschädigten Bereich:

Für die Auswertung des im geschädigten Bereich vorkommenden Injektionsmittels wurden nur Schnitte herangezogen, bei denen eine Schädigung durch den Spaltzugversuch erkennbar war. Die Menge an Injektionsmittel die im geschädigten Bereich erkennbar ist sowie die Anzahl der Proben die zur Auswertung hinzugezogen wurden sind in Abb. 46 dargestellt. Die Bewertung des im Kontaktbereich vorhandenen Injektionsmaterials erfolgte in vier Kategorien. Je höher die Kategorie, desto größer war die im Kontaktbereich zu erkennende Menge an Injektionsmaterial. Das bedeutet, je häufiger die höheren Kategorien in den Kreisdiagrammen vertreten sind, desto besser ist das Injektionsmaterial in den Kontaktbereich eingedrungen.

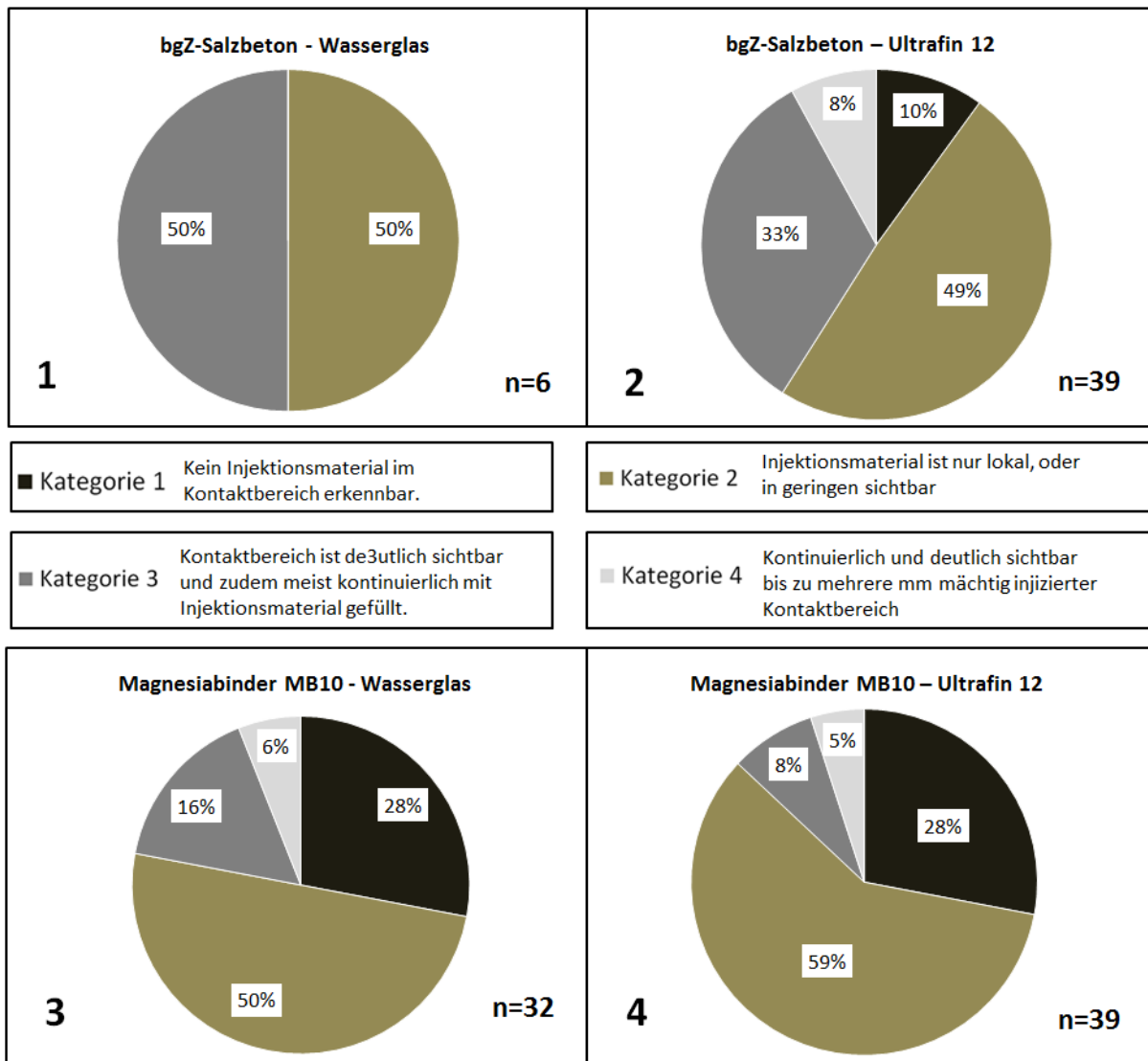


Abb. 46: Übersicht über die Menge des in den geschädigten Bereich injizierten Injektionsmittels für die 4 Materialkombinationen. Diagramm 1: bgZ-Salzbeton und Wasserglas. Diagramm 2: bgZ-Salzbeton und Ultrafin 12. Diagramm 3: Magnesiabinder MB10 und Wasserglas Diagramm 4: Magnesiabinder MB10 und Ultrafin 12.

Mit Ausnahme der mit Wasserglas injizierten bgZ-Salzbeton Probenkörper wurde für die anderen 3 Materialkombinationen eine große Probenanzahl für die Auswertung herangezogen, weswegen nur diese als repräsentativ erachtet werden. Auffällig ist, dass bei den Magnesiabinderprobenkörpern geschädigte Bereiche ohne Injektionsmittel häufiger vorkommen als beim Salzbeton. Bei den 3 Materialkombinationen ist die Kategorie 4, (kontinuierlich und deutlich sichtbar injizierte geschädigte Bereiche) insgesamt am seltensten vertreten. Am häufigsten kommt diese Kategorie jedoch bei den mit Ultrafin 12 injizierten Salzbetonprobenkörpern mit 8 % vor. Die Kategorie 3 (deutlich sichtbar injizierte geschädigte Bereiche) ist mit 33 % bei der Kombination Salzbeton und Ultrafin 12 am häufigsten vertreten und bei der Materialkombination aus Magnesiabinder MB10 und Ultrafin 12 (8 %) am seltensten. Die Materialkombinationen aus Salzbeton und Ultrafin 12 sowie Magnesiabinder und Wasserglas weisen mit 49 bzw. 50 % eine ähnliche Häufigkeit der Kategorie 2 (geschädigter Bereich mit sehr geringen Öffnungsweiten) auf und bei der Kombination aus Magnesiabinder und Ultrafin 12 kommt diese etwas häufiger vor.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei der Materialkombination aus Salzbeton und Wasserglas nur sehr selten geschädigte und mit Injektionsmittel gefüllte Bereiche erkennbar waren. Bei der Materialkombination aus Salzbeton und Ultrafin 12 kommt es seltener als bei den Magnesiabinder Probenkörpern vor, dass nicht mit Injektionsmittel gefüllte geschädigte Bereiche vorhanden sind. Zudem ist der Anteil an geschädigten Bereichen die viel Injektionsmittel enthalten größer. Die Magnesiabinderprobenkörper unterscheiden sich nur durch die Verteilung der Kategorien 2 und 3. Das heißt in den mit Wasserglas injizierten Magnesiabinderprobenkörpern ist mehr Injektionsmittel im geschädigten Bereich erkennbar.

#### Injektion des Salzes:

In dieser Kategorie wurde bewertet, wieviel Injektionsmaterial in das Salz injiziert werden konnte. Dies erfolgte über die Betrachtung der im Salz injizierten Fläche. Je größer die Fläche des injizierten Bereichs im Salz ist, desto besser konnte das Injektionsmaterial in diesen Bereich eindringen. Somit sind die Injektionsmaterialien hinsichtlich Ihres Eindringverhaltens besser zu bewerten, die größere Bereiche innerhalb des Salzes injiziert haben.

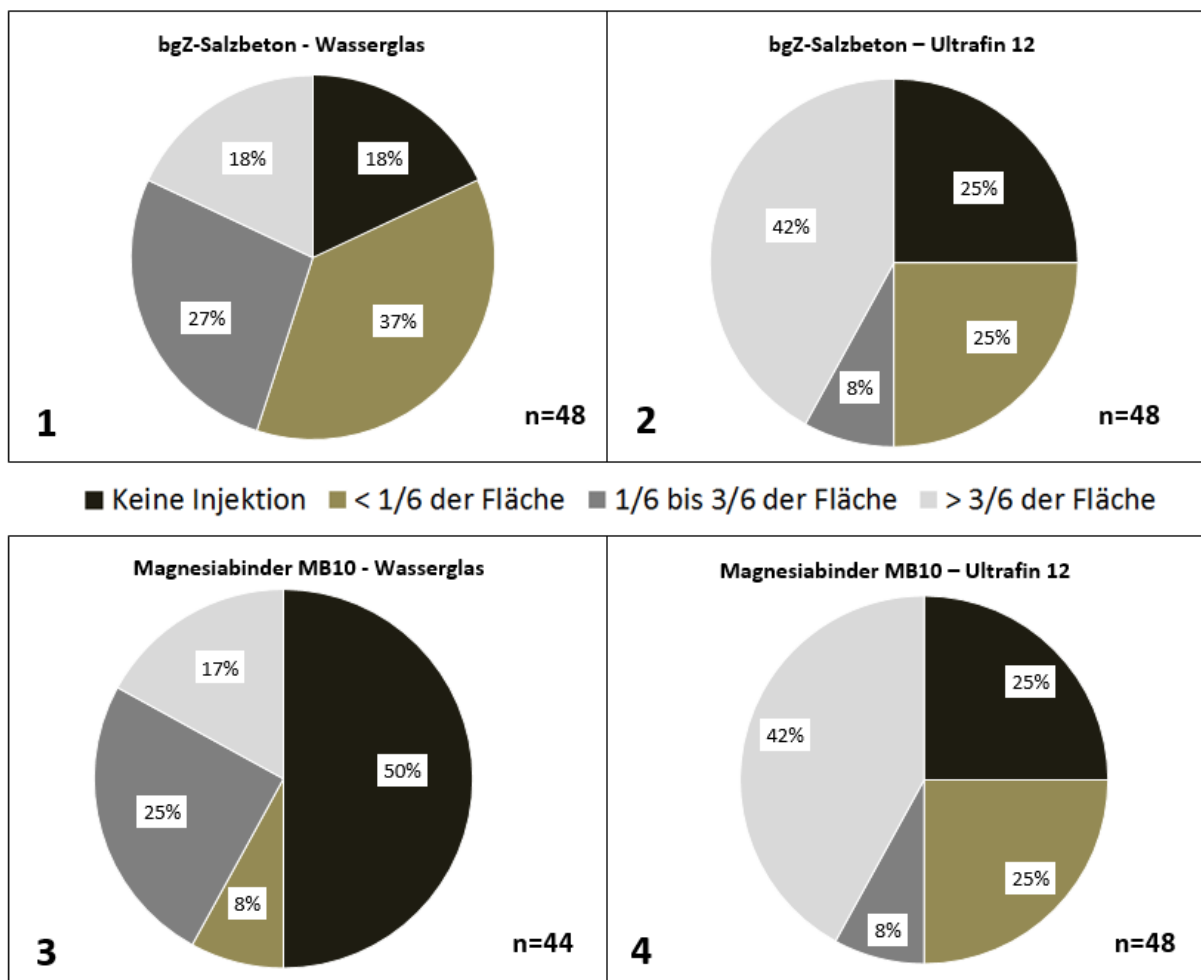


Abb. 47: Übersicht der injizierten Flächen des Steinsalzes für die 4 Materialkombinationen. Diagramm 1: bgZ-Salzbeton und Wasserglas. Diagramm 2: bgZ-Salzbeton und Ultrafin 12. Diagramm 3: Magnesiabinder MB10 und Wasserglas Diagramm 4: Magnesiabinder MB10 und Ultrafin 12.

Bei den beiden mit dem bgZ-Salzbeton hergestellten Probenkörpern gibt es deutliche Unterschiede hinsichtlich der Menge des in das Salz injizierten Injektionsmittels. In der Hälfte der betrachteten

Schnitte des mit dem Wasserglas injizierten bGZ-Probenkörpers war kein Injektionsmittel feststellbar und der Anteil der Schnitte in denen mehr als die Hälfte der Salzfläche injiziert war betrug unter 20 %. Auch die beiden Gruppen der mit dem Magnesiabinder hergestellten Probenkörper unterscheiden sich hinsichtlich des in das Salz injizierten Injektionsmittels in allen 4 Kategorien. Wenn die injizierten Probenkörper hinsichtlich des eingesetzten Injektionsmittels betrachtet werden fällt auf, dass bei den mit Ultrafin 12 injizierten Probenkörpern sowohl bei den Salzbeton als auch bei dem aus Magnesiabinder hergestellten Probenkörpern die exakt gleiche prozentuale Verteilung der injizierten Bereiche im Steinsalz auftrat. Die beiden Gruppen der mit Wasserglas injizierten Probenkörper hingegen unterscheiden sich voneinander. Die Anteile an Schnitten in denen mehr als  $\frac{1}{6}$  der Fläche injiziert wurde sind ungefähr gleich häufig vertreten. Aber bei den Salzbeton Probenkörpern war in etwa der Hälfte der Schnitte kein Injektionsmittel im Salz feststellbar und beim MB10 waren dies nur in etwa 18 % der Schnitte der Fall.

## 7 Interpretation der Ergebnisse

Um geeignete Injektionsmittel zur Abdichtung von Wegsamkeiten mit Öffnungsweiten von unter 150  $\mu\text{m}$  im Kontaktbereich zwischen Streckenverschlussbauwerk und Salzgebirge abdichten zu können, wurden sowohl Versuche im Rahmen einer laborativen Charakterisierung als auch Injektionsversuche an Probenkörpern mit einer künstlichen Kontaktfuge durchgeführt. Im „Kapitel 5 Laborative Charakterisierung“ werden die Ergebnisse der Messungen unter Laborbedingungen sowie eine Berechnung der theoretischen Eindringtiefe der Injektionsmittel detailliert dargestellt. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass aufgrund Ihrer guten rheologischen Eigenschaften der Feinstzement Ultrafin 12 als auch das Wasserglas der Grädigkeit 37/40 nach der Betrachtung der Ergebnisse der laborativen Charakterisierung als besonders geeignet betrachtet wurden, Wegsamkeiten mit geringen Öffnungsweiten im Bereich der Kontaktfuge zu injizieren.

Die in den Laborversuchen ermittelten rheologischen Kenndaten der untersuchten Injektionsmittel ermöglichen jedoch lediglich eine Abschätzung des Eindringverhaltens in poröse Medien. Aufgrund anderer Faktoren, wie zum Beispiel Filterkuchenbildung bei den partikelgestützten Injektionsmitteln oder chemische Reaktionen des Injektionsmittels mit den umgebenden Materialien, kann es bei dem Einsatz der Injektionsmittel unter realitätsnahen Bedingungen zu abweichenden Ergebnissen kommen. Um diese realitätsnahen Einsatzbedingungen bestmöglich nachzubilden, wurden die Salzbeton/Steinsalz bzw. Magnesiabinder/Steinsalz Probenkörper injiziert. Die Auswertung der Injektionsversuche erfolgte in 2 Schritten. Zum einen wurden die injizierten Volumina betrachtet und zum anderen wurden die Probenkörper zersägt und die Verteilung des Injektionsmittels optisch ausgewertet.

Um die Ergebnisse der optischen Auswertung mit den in die einzelnen Probenkörper injizierten Volumina pro cm Probenlänge zu verknüpfen, wurde Abb. 48 erstellt. Im Rahmen der optischen Auswertung des Eindringverhaltens der unterschiedlichen Injektionsmaterialien wurde sowohl für die Auswertung des in den geschädigten Bereich als auch in das Salz injizierten Menge an Injektionsmittel eine Unterteilung in 4 Kategorien unternommen. Diese erhielten für die Erstellung dieser Abbildung die Zahlenwerte eins bis vier, wobei der niedrigste Zahlenwert jeweils der Kategorie mit der geringsten injizierten Menge und der höchste Zahlenwert der Kategorie mit der höchsten injizierten Menge zugeordnet wurde. Anschließend wurden für jeden Probenkörper die Zahlenwerte aus den einzelnen betrachteten Abschnitten aufsummiert und gemittelt. Diese gemittelten Zahlenwerte werden in Abb. 48 auf der X-Achse abgetragen. Je höher der summierte Zahlenwert ist, desto mehr Injektionsmittel wurde in den geschädigten Bereich bzw. das Salz injiziert. Auf der y-Achse wurde abgetragen, wieviel Injektionsmaterial pro cm des Probenkörpers sowohl im Bereich des Kontaktbereichs als auch in das Salz injiziert werden konnte. Je besser sich das Injektionsmaterial injizieren ließ, desto höher sind die Bewertung auf der X-Achse als auch auf der y-Achse.

In Abb. 48 ist zu erkennen, dass im linken unteren Bereich des Diagramms die mit Wasserglas injizierten Salzbeton Probenkörper liegen und dass oben rechts die mit Ultrafin 12 injizierten Salzbetonkörper lokalisiert. Im Bereich dazwischen befinden sich die mit Wasserglas und Ultrafin 12 injizierten Magnesiabinder Probenkörper. Zudem ist der Trend zu erkennen, dass je höher der erzielte Zahlenwert der Probe auf der X-Achse ist, desto mehr Injektionsmittel injiziert werden konnte. Das bedeutet, dass bei den Proben, bei denen ein hohes Volumen pro cm Länge des Salzkerns injiziert werden konnte, das Injektionsmittel sowohl in das Salz als auch in den geschädigten Bereich eingedrungen ist. Jedoch gibt es auch Probenkörper für die diese allgemeine Aussage nicht zutrifft und

in einen der beiden Bereiche deutlich mehr Injektionsmittel eingedrungen ist als in den anderen. Dies trifft für die beiden mit Wasserglas injizierten Salzbetonproben rechts unten in der Abb. 48 zu, bei denen das Salz wesentlich ausgeprägter injiziert wurde als der Kontaktbereich. Ebenso gilt dies für die Oben links liegenden mit Ultrafin 12 injizierten Salzbetonprobenkörper, bei denen wiederum der geschädigte Bereich deutlich intensiver injiziert wurde als das Salz.

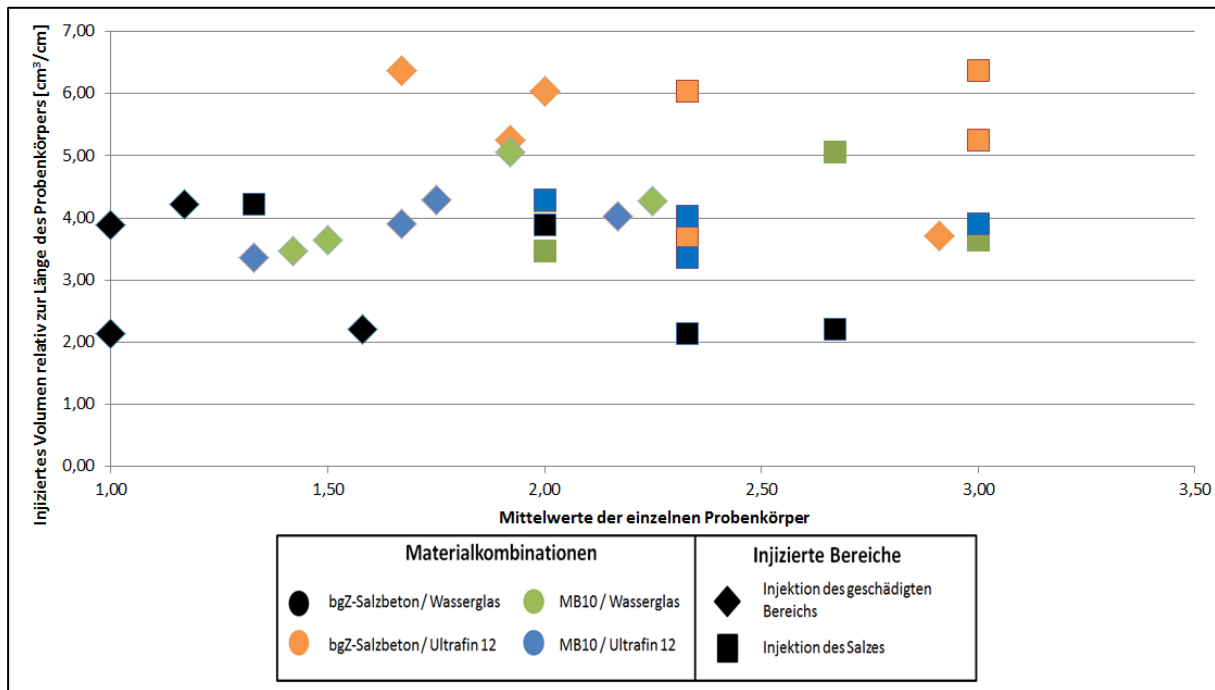


Abb. 48: Darstellung des in den geschädigten Bereich und das Steinsalz injizierten Injektionsmittels für die unterschiedlichen Materialkombinationen in Abhängigkeit des in den jeweiligen Probenkörper injizierten Volumens.

Bei den Injektionsversuchen zeigte sich sowohl bei der Betrachtung des injizierten Volumens als auch bei der optischen Auswertung der Verteilung des Injektionsmittels in den Probenkörpern, dass sich die Materialkombinationen aus Injektionsmittel und Baustoff des Streckenschlussbauwerks hinsichtlich der Mengen, die injiziert werden konnten, unterscheiden. Die optische Auswertung stimmte hierbei mit den Ergebnissen des injizierten Volumens überein.

Auffällig war bei der Auswertung der Injektionsversuche, dass bei der Mehrzahl der Probenkörper, wenn auch in unterschiedlichen Mengenanteilen Injektionsmittel in das Steinsalz eingedrungen ist. Bei den mit Ultrafin 12 injizierten Probenkörpern ist der Anteil an Probenkörpern mit einer vergleichsweise großen injizierten Fläche höher als beim Wasserglas, es dringt somit besser in das Steinsalz ein. Bei der näheren Betrachtung der injizierten Bereiche im Salz fällt auf, dass diese sich in zwei Gruppen unterteilen lassen. Zum einen sind dies Bereiche in denen das Injektionsmittel entlang der Korngrenzen der Salzkristalle vorkommt und zum anderen entlang von Rissen, die annähernd parallel zu den Stirnseiten der Probenkörper verlaufen. Beim Bohren der Kerne fiel auf, dass diese in Scheiben zerbrachen, wobei die Bruchflächen senkrecht zur Achse des Bohrlochs verliefen. Dies kann die Folge einer Auflockerungszone im Salzgebirge sein. Bei der Injektion der Probenkörper wurde das Injektionsmittel nun Entlang von mehr (Risse) oder weniger (entlang von Korngrenzen) stark geschädigten Bereichen in den Salzkernen in das Salz injiziert.

Als überraschend ist das Ergebnis der Injektionsversuche zu bezeichnen, dass sowohl bei der Injektion des geschädigten Bereichs als auch im Salz sowohl optisch als auch nach dem injizierten Volumen der Feinstzement besser eindringen konnte als das Wasserglas. Lediglich bei den Magnesiabinderprobenköpern konnte etwas mehr Wasserglas injiziert werden. Basierend auf den theoretischen Grundlagen sowie den Laborversuchen sollte das partikelfreie Injektionsmittel Wasserglas mit den im Vergleich zum partikelgestützten Ultrafin 12 vorteilhafteren rheologischen Eigenschaften besser injizierbar sein. Durch verschiedene Reaktionen kann es zur Aushärtung des Wasserglases kommen. Dies ist zum einem im Kontakt mit Steinsalz, salinaren Lösungen, CO<sub>2</sub> oder aber auch durch Austrocknung. Daher sind die Ergebnisse der Betrachtung der rheologischen Eigenschaften des Wasserglases unter Laborbedingungen nicht direkt auf das Fließverhalten im Kontakt mit Salz übertragbar.

Das Verhalten des Wasserglases bei den Injektionsversuchen kann auf zwei verschiedene Faktoren zurückzuführen sein. So ist es möglich, dass entlang der aufgelockerten, geschädigten Bereiche in den Salzkernen, die beim Bohren entstanden sind, Salzstaub beim Bohren eingedrungen ist. Während des Injektionsvorgangs kommt das Wasserglas in Kontakt mit dem feinen Salzstaub und löst diesen aufgrund der großen reaktiven Oberfläche wesentlich schneller an als dies mit festen Salz der Fall wäre, wodurch die Gelierung des Wasserglases beschleunigt und somit die Fließfähigkeit reduziert wird. Auf das Fließverhalten des Feinstzements hat dieser Salzstaub keinen wesentlichen Einfluss, da er entweder im Zement gelöst werden kann, oder in die Suspension aufgenommen wird und hier erst in erheblichen Mengenanteilen zur Veränderung der rheologischen Eigenschaften beiträgt. Bei der Injektion der Salzbetonprobenkörper mit dem Wasserglas kann zudem noch ein weiterer Effekt von Bedeutung gewesen sein. Beim Zersägen der Probenkörper fiel auf, dass der Salzbeton direkt nach dem Sägen relativ dunkel ist und dann nach kurzer Zeit an der Luft deutlich heller wird. Dies deutet darauf hin, dass der Salzbeton Feuchtigkeit an die Luft abgibt und austrocknet. Möglicherweise ist ein Teil dieser Feuchtigkeit vor der Injektion in die im Spaltzugversuch geschädigten Bereiche eingedrungen, hat das Salz befeuchtet und führt somit zu einer schnelleren Gelierung des Wasserglases.



## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Derzeit stellt der Kontaktbereich zwischen Streckenverschlussbauwerk und dem Salzgebirge aufgrund der in diesem Bereichen auftretenden und im Vergleich zum Baustoff des Streckenverschlussbauwerks und dem umgeben Gebirge erhöhten Permeabilitätswerten einen möglichen Migrationspfad für zutretende Lösungen in ein HAW-Endlager dar. Um den sicheren Einschluss der eingelagerten radioaktiven Abfälle in den ersten Jahrhunderten bis Jahrtausenden nach der Einlagerung gewährleisten zu können ist es nötig, den Kontaktbereich gezielt durch Injektionsmaßnahmen abzudichten.

Im Unterschied zu Abdichtinjektionen im Tunnelbau, Spezialtiefbau oder Bergbau ist die Kontaktfugeninjektion für Streckenverschlussbauwerke aus Salz- oder Sorelbeton im Salzgebirge eine außergewöhnliche Aufgabenstellung. Dies liegt zum einen an den Rahmenbedingungen die sich aus dem Einsatz in einem HAW Endlager ergeben sowie zum anderen an der für Injektionsarbeiten ungewöhnlichen Gesteinsformation Salz. Bedingt durch diese beiden Einflussfaktoren steht nur eine geringe Anzahl an grundsätzlich einsetzbaren Injektionsmaterialien zur Abdichtung von Streckenverschlussbauwerken im Salinar zur Verfügung, über die zudem ein vergleichsweise geringer Kenntnisstand vorliegt.

Um jedoch die im Kontaktbereich zwischen Baustoff des Streckenverschlussbauwerks und Salzgebirge vorhandenen Wegsamkeiten mit geringen Öffnungsweiten injizieren und somit die integrale Permeabilität des Streckenverschlussbauwerks zu reduzieren sind nähergehende Untersuchungen an geeigneten Injektionsmaterialien nötig. Hierzu zählt zu einen die Ermittlung von rheologischen Kennwerten unter den am Einsatzstandort zu erwartenden Temperaturen, als auch die Ermittlung von Kennwerten, die über die routinemäßig im Rahmen der Materialprüfung von Baustoffen ermittelten Materialkennwerte hinausgehen. Nur somit ist ein detaillierter Vergleich der Injektionsmaterialien, sowie eine Abschätzung deren Eindringverhaltens in Wegsamkeiten mit geringen Öffnungsweiten möglich. Jedoch haben in der Praxis über die rheologischen Kennwerte hinaus weitere Faktoren einen Einfluss auf das Eindringverhalten der Injektionsmaterialien. Um die Injektion des Kontaktbereichs zwischen Streckenverschlussbauwerk und Steinsalz möglichst realitätsnah im Labormaßstab abzubilden wurde im Rahmen dieser Arbeit erstmalig unter Laborbedingungen eine Kontaktfuge zwischen Steinsalz und Baustoffen für Streckenverschlussbauwerke erzeugt und injiziert.

Das Ziel der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche lässt sich somit in zwei Bereiche untergliedern. Dies war zum einen die Erweiterung des Kenntnisstandes zu den rheologischen Eigenschaften der untersuchten Injektionsmaterialien und zum anderen die Injektion einer Kontaktfuge zwischen Baustoffen für Streckenverschlussbauwerke und Steinsalz unter Laborbedingungen.

Zu Beginn dieser Arbeit wurden Injektionsmaterialien ausgewählt, die spezifische Materialanforderungen erfüllen und somit unter den spezifischen Anforderungen die sich aus dem Einsatz im Salinar und einem HAW Endlager ergeben einsetzbar sind. Ausgewählt wurden fünf Injektionsmaterialien, von denen drei partikelgestützt und zwei partikelfrei waren. Eines der ausgewählten Injektionsmaterialien war Natronwasserglas. Natronwasserglasinjektionen im Salinar stellen einen Spezialfall bei Injektionsarbeiten dar, über den nur im geringen Umfang Kenntnisse vorliegen. Dies betrifft sowohl das Ausbreitverhalten des Natronwasserglases im Kontakt mit den im

Bereich der Kontaktfugen anzutreffenden Materialien, als auch das Erhärtungsverhalten und dessen Einfluss auf die Abdichtung der Kontaktfuge.

Um den Kenntnisstand über die ausgewählten Injektionsmaterialien hinsichtlich des Eindringverhaltens in Wegsamkeiten mit geringen Öffnungsweiten zu erweitern, wurden im Rahmen dieser Arbeit zum einen rheologische Kennwerte zur Charakterisierung des Fließverhaltens der Injektionsmaterialien ermittelt und zum anderen Versuchen zur Injektion einer künstlich erzeugten Kontaktfuge im Labormaßstab durchgeführt.

Üblicherweise werden rheologischen Kennwerte von Injektionsmaterialien bei Temperaturen von 20 °C ermittelt. Aufgrund der Teufenlage sowie der guten Wärmeleitfähigkeit des Salzgebirges sind im Bereich der abzudichtenden Streckenverschlussbauwerke jedoch höhere Temperaturen zu erwarten. Da die meisten rheologischen Kennwerte temperaturabhängig sind, wurden die rheologischen Werte bei den für ein potentiell Endlager im Salzgebirge typischen Temperaturen von 30 bzw. 40° C ermittelt. Für die untersuchten Injektionsmaterialien wurden im Rahmen bisheriger Arbeiten die Marshtrichterauslaufzeit sowie die dynamische Viskosität ermittelt. Da das Eindringverhalten in Wegsamkeiten jedoch durch weitere Kennwerte beeinflusst wird, wurden die Grenzflächenspannung sowie der Kontaktwinkel für die Injektionsmaterialien ermittelt. Mit Hilfe dieser Kennwerte konnte die theoretische Injektionsreichweite der Injektionsmaterialien berechnet werden. Hierbei zeigte sich, dass das Natronwasserglas die höchste Injektionsreichweite aufweist und die rechnerische Injektionsreichweite relativ geringen zeitlichen und temperaturbedingten Schwankungen unterliegt. Erstaunlicherweise wies der Feinstzement Ultrafin 12 eine größere Injektionsreichweite auf als das Injektionsharz Denepox 40.

Um das Eindringverhalten von Natronwasserglas sowie des Feinstzements Ultrafin 12 in Wegsamkeiten mit geringen Öffnungsweiten zu untersuchen, wurde im Labormaßstab eine künstliche Kontaktfuge erzeugt und injiziert. Das Eindringverhalten von Injektionsmaterialien hängt neben den rheologischen Kennwerten auch von der Beschaffenheit der zu injizierenden Wegsamkeit, Wechselwirkungen zwischen Injektionsmaterial und den Wandungen der Wegsamkeit sowie chemischen Interaktionen zwischen den unterschiedlichen Materialien ab. Bei den durchgeführten Injektionsversuchen standen die Injektionsmaterialien in Kontakt mit Steinsalz sowie unterschiedlichen Baustoffen zur Errichtung von Streckenverschlussbauwerken. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Injektionsversuche waren die ersten Injektionsversuche im Labormaßstab, bei denen ein direkter Vergleich des Eindringverhaltens unterschiedlicher Injektionsmaterialien in eine Kontaktfuge mit einer definierten Öffnungsweite und im Kontakt mit unterschiedlichen Materialien erfolgte.

Die Auswertung der durchgeführten Injektionsversuche zeigte, dass neben dem im Spaltzugversuch geschädigten Bereich vielfach auch das Steinsalz entlang von Rissen oder aufgelockerten Bereichen injiziert werden konnte. In die mit dem bgZ-Salzbeton erstellten Probenkörper ließ sich deutlich mehr Ultrafin 12 (57 %) als Wasserglas injizieren und bei den Sorelbetonprobenkörpern geringfügig mehr Wasserglas (5 %). Insgesamt konnte in die mit dem bgZ-Salzbeton hergestellten Probenkörper 13 % mehr Injektionsmaterial injiziert werden als in die Sorelbetonprobenkörper und in alle Probenkörper wurde 21 % mehr Ultrafin 12 als Wasserglas injiziert.

Dies stellt ein überraschendes Ergebnis dar, da aufgrund der rheologischen Eigenschaften das Wasserglas 37/40 besser in vorhandene Wegsamkeiten eindringen sollte als das partikelgestützte

Injektionsmaterial Ultrafin 12. Dies kann auf Staub entlang der injizierten Risse bzw. aufgelockerten Bereiche im Salz oder Feuchtigkeit aus dem Salzbeton zurückzuführen sein. Salzstaub kann aufgrund der im Vergleich zu anstehenden Steinsalz wesentlich größeren Oberfläche schneller vom Wasserglas angelöst werden, wodurch es zu einer beschleunigten Gelierung kommt. Auch Feuchtigkeit kann zum einem beschleunigten Gelierungsprozess des Natronwasserglases führen. Die Versuche haben prinzipiell gezeigt, dass beide Injektionsmaterialien geeignet sind Wegsamkeiten mit geringen Öffnungsweiten als auch aufgelockerte Bereiche im Salz zu injizieren.

Dessen ungeachtet resultieren aus den Versuchen noch unbeantwortete Aufgabe- und Fragestellungen, deren Beantwortung den Kenntnisstand über Injektionsmaterialien zur Kontaktfugeninjektion verbessert und somit zum Erreichen einer niedrigen integralen Permeabilität bei Streckenverschlussbauwerken beiträgt:

- Entscheidend für das Eindringverhalten von partikelgestützten Injektionsmaterialien ist die Partikelgrößenverteilung in der Suspension. Diese wird maßgeblich durch den verwendeten Mischprozess sowie die Mischzeiten beeinflusst. Daher ist es wichtig, die eingesetzte Mischtechnik sowie die Mischzeiten auf die eingesetzten Injektionsmaterialien abzustimmen, um Agglomerationen in der Suspension zu vermeiden und möglichst geringe Partikelgrößen in der Suspension zu erreichen.
- Um den Einsatz von Natronwasserglas im Kontakt mit leichtlöslichen Kalisalzen zu ermöglichen ist experimentell zu klären, ob es infolge des Wassergehaltes des Natronwasserglases zu signifikanten Anlöseprozessen und der Ausbildung von Wegsamkeiten kommt.
- Da Natronwasserglas die anstehenden Salzminerale anläst, wodurch die Gelierung des Wasserglases einsetzt, wird dessen zeitabhängige Viskosität maßgeblich durch den Kontakt mit dem Salinar beeinflusst. Daher ist der Einfluss unterschiedlicher Salzminerale auf den zeitabhängigen Viskositätsverlauf und somit die maximalen Verarbeitungszeiten von Natronwasserglas zu ermitteln.
- Aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens von Natronwasserglas im Kontakt mit verschiedenen Salzmineralen sind detailliertere Kenntnisse zum Erhärtungsverhalten und zeitabhängigen Haftzugfestigkeiten zu ermitteln.
- Zur Durchführung einer detaillierten Bewertung des Einflusses des Injektionsregimes, das heißt der Kombination aus Injektionsrate und Injektionsdruck für unterschiedliche Injektionsmaterialien auf den Abdichterfolg.

Darüber hinaus sind für die Abdichtung der Kontaktfuge und insbesondere für die Auswahl geeigneter Injektionsmaterialien Informationen über die zu erwartenden Porenweiten bzw. Porenweitenverteilungen im Kontaktbereich zwischen Streckenverschlussbauwerk und Salzgebirge wichtig. Mit diesen Informationen wird eine präzisere Abstimmung der einzusetzenden Injektionsmittel auf die zu erwartenden Bedingungen ermöglicht.

Die Auswahl des geeigneten Injektionsmaterials muss immer standortspezifisch erfolgen. Generell wird die Auswahl des Injektionsmaterials durch die Geologie am Standort des Streckenverschlussbauwerks sowie den Baustoff des Streckenverschlussbauwerks vorgegeben, da das eingesetzte Injektionsmaterial mit diesen beiden Materialein kompatibel sein muss. Nach Auswahl der Lokationsbezogen für geeignet eingeschätzten Injektionsmaterialien können die grundsätzlich kompatiblen Injektionsmaterialien in Abhängigkeit von der im Kontaktbereich zu erwartenden Rissöffnungsweite weiter spezifiziert werden. Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten

Injektionsversuchen konnten sowohl mit dem untersuchten Feinstzement Ultrafin 12 als auch mit Natronwasserglas der Grädigkeit 37/40 erfolgreich Kontaktfugen in unter Laborbedingungen hergestellten Probenkörpern injiziert werden.

## Literatur

- [1] *Michel, R.*: Geschichte der Radioaktivität: Von der Euphorie zur Radiophobie. Präsentation. Leibnitz Universität Hannover - Institut für Radioökologie und Strahlenschutz. 10. November 2012.
- [2] *Deutsches Atomforum*: Kernenergie und Kerntechnik in Deutschland und weltweit.  
[http://www.kernenergie.de/kernenergie-wAssets/docs/service/043kernenergie\\_kerntechnik2014.pdf](http://www.kernenergie.de/kernenergie-wAssets/docs/service/043kernenergie_kerntechnik2014.pdf). Aufgerufen am: 15.02.2015.
- [3] *Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)*: Abfallarten.  
[http://www.bfs.de/DE/themen/ne/abfaelle/arten/arten\\_node.html](http://www.bfs.de/DE/themen/ne/abfaelle/arten/arten_node.html), Aufgerufen am: 31.10.2015.
- [4] *Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)*: Abfallprognosen.  
[http://www.bfs.de/DE/themen/ne/abfaelle/prognosen/prognosen\\_node.html](http://www.bfs.de/DE/themen/ne/abfaelle/prognosen/prognosen_node.html), Aufgerufen am: 31.10.2015.
- [5] *Müller-Lyda, I., Brasser, T.*: Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland. Hauptband. Köln, Hannover: GRS; Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek 2008.
- [6] *Wissenschaftlich-Technische Ingenieurberatung GmbH (WTI) und Gesellschaft für Nuclear-Service mbH (GNS)*: Standortunabhängiges Konzept für die Nachqualifizierung und Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle aus der Schachanlage Asse II. GNS B 088/2010, Rev. 02. 21.07.2011.
- [7] Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das zuletzt durch 307 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist.
- [8] *Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE)*: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Verfahrensunterlage. Verfüllung von Strecken mit hohen Anforderungen - Konzeptplanung und Nachweisführung. Unterlagen-Nr.: P 195. Revision: 00. Unteragentitel Teil 1 von 2. 2004.
- [9] *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Stand: 30. September 2010.
- [10] *Müller-Lyda, I.*: Eigenschaften von Salzgrus als Versatzmaterial im Wirtsgestein Salz. Bericht über den Workshop des Bundesamts für Strahlenschutz und des Projektträgers Entsorgung vom 18. und 19. Mai 1999 (in Salzgitter). Köln: GRS 1999.
- [11] *Grundfeldt, B., Jones, C., Wiborgh, M., Anderson, J., Kreusch, J., Appel, D.*: Sicherheitstechnische Einzelfragen - Bedeutung des Mehrbarrierenkonzepts für ein Endlager für radioaktive Abfälle beim Nachweis der Einhaltung von Schutzziele. Abschlussbericht (erstellt im Auftrag des BfS, Stand 07.10.2005). Kemakta AR 2005-28, 201 s. Stockholm 2005.
- [12] *Kröhn, K.-P.*: Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz. REPOPERM - Phase 1. Köln: GRS 2009.
- [13] *Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)*: Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland - Das Endlagerprojekt Gorleben. Oktober 2008.
- [14] *Müller-Hoeppe, N., et. al.*: Integrität geotechnischer Barrieren. Teil 1 Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Köln: GRS 2012.
- [15] *Kudla, W., Dahlhaus, F.*: Abschlussbericht - Diversitäre und redundante Dichtelemente für langzeitstabile Verschlussbauwerke. Freiberg 31. Juli 2009.
- [16] *Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)*: Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Wirtsgesteine im Vergleich. Synthesebericht des Bundesamtes für Strahlenschutz. Salzgitter. 04.11.2005.
- [17] *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)*: BGR-Faktenblatt. Ton- und Tonsteinforschung.  
[http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Downloads/Schriften/3\\_Wirtsgesteine\\_Salz\\_Ton\\_Granit/BGR\\_Faktenblatt\\_Ton\\_Tonsteinforschung\\_112014.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Downloads/Schriften/3_Wirtsgesteine_Salz_Ton_Granit/BGR_Faktenblatt_Ton_Tonsteinforschung_112014.pdf?__blob=publicationFile&v=4), Aufgerufen am: 17.02.2016.
- [18] *Entsorgungskommission (ESK)*: Gruppe 2: Wissen und Wissenslücken zum Wirtsgestein Tonstein. ESK-Workshop zur deutschen Endlagerforschung: Ergebnisse aus der Diskussionsrunde Herr Lux / Herr Geckeis. Bonn. 20./21.01.2015.

- [19] *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)*: Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland - Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potentiell geeigneten Wirtsgesteinsformationen. Hannover/Berlin. April 2007.
- [20] *Rothfuchs, T., Wieczorek, K., Hunsche, U., Hansen, F., Brewitz, W.* (Hg.): EDZ in Rock Salt. In: Impact of the excavation damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories. Tagung: Proceedings of an European Commission Cluster Conference and Workshop in Luxembourg. 03 -05.11.2003.
- [21] *Institut für Gebirgsmechanik GmbH*: Untersuchungen zur Barrierenintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept. Abschlussbericht. Auftraggeber: Bundesamt für Strahlenschutz. Auftragsnummer B IFG 21/2004. Leipzig 17.09.2007.
- [22] *Bochkareva, R.*: Zur Untersuchung des Mechanismus der Bildung einer offenen Porosität im Salzgestein unter mechanischer Beanspruchung und deren Zusammenhang mit Deformationsparametern des Gesteins. Moskauer Staatliche Bergbauuniversität. Moskau. 1999.
- [23] *Mauke, R., Laske, D.*: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Verfahrensunterlage. Stilllegung Endlager Morsleben. Verfüllen von Strecken mit hohen Anforderungen. Bauzustände für horizontale Strecken (ergänzende Untersuchungen zum Nachweis der Rissbeschränkung im Salzbeton) und Nachweiskonzept für das südliche Wetterelloch. Unterlagen-Nr.: P 255 Revision: 00. 2007.
- [24] *Bollingerfehr, W., Filbert, W., Pöhler, M., Tholen, M., Wehrmann, J.*: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW - ISIBEL. AP 1.2 - Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars. April 2008.
- [25] *Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)*: Endlager Morsleben. Die Abdichtbauwerke des Stilllegungskonzepts. <http://www.endlager-morsleben.de/Morsleben/DE/themen/stilllegungskonzept/abdichtbauwerke/abdichtbauwerke.html>, Aufgerufen am: 17.02.2016.
- [26] *Pettenpohl, H., Pier, J.*: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Verfahrensunterlage. Konzeptplanung für die Errichtung und Nachweisführung für die Funktionstüchtigkeit von temporären Abdichtungen. Unterlagen-Nr.: P 264. Revision: 00. 2006.
- [27] *Knoll, P., et. al.*: Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV. Abschlussbericht zum Vorhaben. FZK 02 C 0942. März 2005.
- [28] *Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE)*: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Verfahrensunterlage. Verfüllen von Strecken mit hohen Anforderungen. Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2. Unterlagen-Nr.: P 192. Revision: 00. 2004.
- [29] *Wieczorek, K., Schwarzieneck, P.*: Untersuchungen zur Auflockerungszone im Salinar (ALOHA2) - Untersuchungen zur hydraulisch wirksamen Auflockerungszone um Endlagerbereiche im Salinar in Abhängigkeit vom Hohlraumabstand und Spannungszustand. Abschlussbericht. GRS 198. April 2004.
- [30] *Wittke, B.*: Permeabilität von Steinsalz - Theorie und Experiment. Essen: Verl. Glückauf. Veröffentlichungen Geotechnik in Forschung und Praxis.
- [31] *Knoll, P., et. al.*: Entwicklung eines Grundkonzeptes für langzeitstabile Streckendämme im leichtlöslichen Salzgestein (Carnallit) für UTD/UTV. Zusammenfassender Abschlussbericht. Teil 2: Erprobung von Funktionselementen. Teutschenthal. 31. Dezember 2010.
- [32] *Gläß, F., Mauke, R., Eilers, G., Preuss, J., Schmidt, H., Lerch, C., Müller-Hoepe, N.*: Investigations of a Salt-Concrete Seal in the Asse salt mine. Tuscan, AZ February, 27-March 2005.
- [33] *Müller-Hoepe, N., Pöhler, M.*: Ein neuer Ansatz zur Bewertung der Wirksamkeit von Barrieren im Endlager (02 E 9087): Dokumentierte Erfahrung hinsichtlich dichter Dammbauwerke im Salinar - Abschlussbericht. Peine 1999.

- [34] Krauke, W., Fliß, T.: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Verfahrensunterlage. Konzeptplanung und Nachweisführung für ein Abdichtungsbauwerk im Hauptanhydrit aus Magnesiabinder. Unterlagen-Nr.: P 266. Revision: 00. 2008.
- [35] Kolditz, H., Steinberg, S.: Versiegelung des Carnallitits im Bohrschacht Asse 4. Kali und Steinsalz Band 11 (Mai 1992), S. 23–32.
- [36] Schwerter, R.: Die Bekämpfung von Salzlösungszuflüssen. Kali und Steinsalz Band 11 (Main 1992), S. 32–43.
- [37] Eyermann, T.J., Van Sambeek, L.L., Hansen, F.D.: Case Studies of Sealing Methods and Materials Used in the Salt and Potash Mining Industries. Sandia Report. SAND95-1120 - UC-721. Sandia National Laboratories. November 1995.
- [38] Klemme, J.: The Conversion of the Abandoned Potash Mine "Wilhelmine-Carlsgrück" in Hulslen/Verden, West Germany to Crude Oil Storage". In Situ Vol. 3 (1979), S. 121–146.
- [39] Neuhauser, K., Redetzke, D.: An Applied Geophysical Detection and Subsequent Mitigation of an Abandoned Well Casing Penetrating Hutchinson Salt at an Undisclosed Kansas Salt Mine. The Compass: Earth Science Journal of Sigma Gamma Epsilon Volume 85 (2013), S. 120–133.
- [40] Fischle, W.: Injektionen von Kunstharz in den Auflockerungsbereich um eine Strecke auf der 490-m-Sohle der Schachanlage Asse. Kali und Steinsalz Band 10 (März 1989), S. 90–97.
- [41] Kaledin, O.: Abdichtung und Verfestigung der konturnahen Auflockerungszone beim Errichten von Verschlussbauwerken im Carnallitgestein unter Verwendung von Kunststoffinjektionen. Dissertation. Technische Universität Bergakademie Freiberg. 2008.
- [42] Ahrens, E., Onofrei, M.: Ultrafine Cement Grout For Sealing Underground Nuclear Waste Repositories. Sandia National Laboratories. 1996.
- [43] Kuk, M.: Untersuchungen zur Beeinflussung der Feinstbindemittelausbreitung im Lockergestein durch Filtrationsmechanismen. Dissertation. Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Hannover. 2004.
- [44] Krauke, W., Klimpe, A., Laske, D.: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Verfahrensunterlage. Verfüllen untertägiger Bohrungen mit Magnesiabinder. Unterlagen-Nr.: P 174. Revision: 00. 1999.
- [45] Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE): Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Verfahrensunterlage. Anforderungen an Salzbeton als Baustoff für Abdichtungsbauwerke im Steinsalz. Unterlagen-Nr.: G 296. Revision: 00. 2009.
- [46] Dahlhaus, F., Haucke, J.: Langzeitverhalten von Beton unter salinaren Bedingungen für langzeitstabile Verschlussbauwerke. Bergbau. 3. März 2012. 63. Jahrgang, S. 101–106.
- [47] Wakeley, L.D., Burkes, J.P.: Distribution of Chloride in a Salt-Saturated Grout in Contact with Halite Rock. Cement and Concrete Research. Vol. 16. S. 267–274. 1986.
- [48] Mischo, H.: Untersuchungen an Baustoffen auf Steinsalz-Anhydrit-Basis für Dammbauwerke im Salzgebirge. Techn. Univ., Diss.-Clausthal, 2002. Aachen: Shaker 2002.
- [49] Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt: AG Morsleben: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des ERA Morsleben. Prüfkompex 7 "Verfüllen und Verschließen von Strecken", Teil 2. Sachstandsbericht 2011.
- [50] HS\_OWL. <http://www.hs-owl.de/fb3/labore/geo/forschung-und-drittmittelprojekte/print.html>, Aufgerufen am: 03.02.2016.
- [51] Funehag, J., Axelsson, M.: Hydrological characterisation and sealing of narrow fractures in hard rock - A case study. RMZ - Materials and Geoenvironment Vol. 50, (2003), S. 121–124.
- [52] Vogel, H.: Dränfähige Stabilisierungsinjektionen in erosions- und suffosionsanfälligen Lockergesteinen. Dissertation. Technische Universität Darmstadt. Fachbereich Geowissenschaften und Geographie. Darmstadt. 1999.
- [53] Bollingerfehr, W., von Borstel, L.E., Engelhardt, W.-J., Müller, C., Schmidt, H.: Vergütung der Auflockerungszone im Salinar (VerA). Abschlussbericht. Peine. Dezember 2011.

- [54] *Gruner, M., Kawka, A., Knoll, P.*: Verfahren und Zusammensetzung zum Abdichten von Strecken im Bergbau und/oder eines Baukörpers. Patentschrift: DE102005009036 B8. Anmelder: GTS Grube Teutschenthal Sicherungs GmbH & Co. Kg. 2005.
- [55] *Niemeyer, M., et. al.*: Endlager Morsleben. Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem Programm PROSA. Unterlagen-Nr.: P 277. 2009.
- [56] *Bach, J.*: Untersuchung der lösekinetischen Vorgänge beim Ersaufen der Straßfurter Kaligruben. Abschlussbericht FVV TV4. 2010.
- [57] <http://193.175.110.91/salzwiki/index.php/Kieserit>, Aufgerufen am: 22.01.2016.
- [58] <http://193.175.110.91/salzwiki/index.php/Deliqueszenzfeuchte>, Aufgerufen am: 22.01.2016.
- [59] *Meyer, T., Herbert, H.J., Schmidt Döhl, F.*: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. verfahrensunterlage. Endlager Morsleben. Korrosion von Salzbeton durch salinare Lösungen. Unterlagen-Nr.: P 180. Revision: 00. 2003.
- [60] *Priestel, U., Kudla, W., Gruner, M.*: Aktuelle Erfahrungen beim Einsatz von MgO-Beton in untertägigen Bauwerken im Carnallitit. [http://www.tu-freiberg.de/~wwwgeoli/erdbau/Publikationen/VortragGeomechanikkolloquium2006\\_Priestel.pdf](http://www.tu-freiberg.de/~wwwgeoli/erdbau/Publikationen/VortragGeomechanikkolloquium2006_Priestel.pdf) ?PHPSESSID=169f77494282790bd5e493c33c7bd949, 10.01.2016.
- [61] (Auszug aus DIN EN 12715 Injektionen, 2000).
- [62] Technische Informationen zum Injektionsmörtel IM 4+. Stand 09.11.2010 2010.
- [63] *HeidelbergCement AG*: Prüfzeugnis. Ultrafin 12 - Laboruntersuchungen zur Rheologie bei diversen Suspensionsdichten. 22.07.2010.
- [64] *Erstellt von: BGR, DBE Technology GmbH, GRS, IFG, KIT*: FEP-Katalog für die VSG. Dokumentation. Bericht zum Arbeitspaket 7. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-283. Juni 2012.
- [65] *Buja, H.-O.*: Spezialtiefbautechnik von A - Z. Grundlagen, Gerätetechnik, Verfahren ; [das Fachbuch für Studium und Praxis]. Norderstedt: Books on Demand. 2013.
- [66] *Dietz, C.*: Künstliche Sandverkiegelung. Zeitschrift für praktische Geologie (1933), S. 57–61.
- [67] *De Neef Construction Chemicals bvba*: Produktdatenblatt-Epoxydharze. Denepox 40. Sehr niedrigviskoses " 2-Komponenten Epoxydharz zur Verstärkung von Betonelementen. [http://www.deneef.com/Site/index2.php?option=com\\_docman&task=doc\\_view&gid=2168&Itemid=80](http://www.deneef.com/Site/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=2168&Itemid=80). Aufgerufen am: 16.02.2016.
- [68] *Lienhard, J., Gabler, M., Cremers, J., Knippers, J.*: Construction Manual for Polymers + Membranes. Materials / Semi-finished Products / Form Finding / Design. Basel: De Gruyter 2012.
- [69] *U.S. Department of the Interior - Bureau of Mines. Staff, Denver Research Center*: Comparative Study of Rock Support Systems for a High level Nuclear Waste Geologic Repository in Salt. (Interagency Agreement NRC-02-80-075) Dezember, 1987.
- [70] *Jankowski, A.*: Polyurethane for consolidation of rock. Glückauf vol. 108 (1972), S. 582–584.
- [71] *Christen, D. S.*: Praxiswissen der chemischen Verfahrenstechnik. Handbuch für Chemiker und Verfahreningenieure. Heidelberg: Springer 2010.
- [72] *Suter, D.*: Vorlesungsnotizen: Einführung in die Medizinphysik I – Blutkreislauf. (SS 2015).
- [73] [http://www.chemgapedia.de/vsengine/glossary/de/platte\\_00045platte\\_00045viskosimeter.glos.html](http://www.chemgapedia.de/vsengine/glossary/de/platte_00045platte_00045viskosimeter.glos.html). (Aufrufdatum: 05.01.2015).
- [74] *TA Instruments*: AR 500 / 1000 Rheometer. Hardware Manual.
- [75] [http://www.chemgapedia.de/vsengine/glossary/de/platte\\_00045platte\\_00045viskosimeter.glos.html](http://www.chemgapedia.de/vsengine/glossary/de/platte_00045platte_00045viskosimeter.glos.html), Aufgerufen am: 05.01.2016.
- [76] DIN 4127 (2014-02-00): Erd- und Grundbau – Prüfverfahren für Stützflüssigkeiten im Schlitzwandbau und für deren Ausgangsstoffe.
- [77] *Guria, C., Kumar, R. & Mishra, P.*: Rheological analysis of drilling fluid using Marsh Funnel. Journal of Petroleum Science and Engineering (2013), S. 62–69.
- [78] Betriebsanleitung Set zur Dichtebestimmung für Analysenwaage KERN ABT. Version 1.0. 02/2007. KERN & Sohn GmbH. (Aufrufdatum 14.12.2015).



- [79] *Wischers, G.*: Ansteifen und Erstarren von Zement und Beton. Beton 31 (1981), S. 337–340.
- [80] *Engelhardt, J.*: Einfluss von Salzen auf die Hydratation und die Festmaterialeigenschaften von API-Zementen.
- [81] *Mollet, H., Grubenmann, A.*: Formulierungstechnik. Emulsionen, Suspensionen, feste Formen. Weinheim [u.a.]: Wiley-VCH 2000.
- [82] *Habenicht, G.*: Kleben. Grundlagen, Technologien, Anwendung. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg 2002.
- [83] *Engelfried, J.*: Nachhaltiges Umweltmanagement. Management 10-2012. 2., vollst. überarb., aktual. u. erw. Aufl. München: Oldenbourg 2011.
- [84] 2009: Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. Verfahrensunterlage. Anforderungen an Salzbeton als Baustoff für Abdichtungsbauwerke im Steinsalz. Unterlagen-Nr. G 296. Revision: 00.
- [85] *Lengwenat, E.*: Vorlesungsskript: Mehrdimensionale Bewertungsverfahren. Technische Universität München - Lehrstuhl für Forstliche Wirtschaftslehre. Verfügbar unter: [http://www.fwl.wi.tum.de/fileadmin/Downloads/Master\\_Forst/Skript\\_Nutzwertanalyse.pdf](http://www.fwl.wi.tum.de/fileadmin/Downloads/Master_Forst/Skript_Nutzwertanalyse.pdf) Aufgerufen am: 09.03.2016.
- [86] *HeidelbergZement Ag*: Technisches Merkblatt ULTRAFIN 12.
- [87] *Girmscheid, G.*: Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau. Berlin: Ernst, Wilhelm & Sohn 2012.
- [88] *Prinz, H., Strauß, R.*: Ingenieurgeologie. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl. 2011.
- [89] *Borstel, L. v.*: Demonstrationsversuche zur Beschreibung der Viskositätsveränderung beim Übergang von Natronwasserglas zu Silicatgel. Technischer Bericht. 2015.
- [90] *Verein Deutscher Zementwerke*: (Hg.): Zement-Taschenbuch. 51. Aufl. Düsseldorf: Verlag Bau + Technik. 2008.
- [91] *Weigler, H., Karl, S.*: Beton. Arten, Herstellung, Eigenschaften. Berlin: Ernst. 1989.
- [92] *Düsterloh, U.*: Geotechnische Sicherheitsnachweise für Hohlraumbauten im Salinargebirge unter besonderer Berücksichtigung laborativer Untersuchungen. Ein Beitrag zum Nachweis von Standsicherheit und Barrierenintegrität für untertägige Abfallentsorgungsanlagen und Hohlraumbauten des salinaren Berg- und Kavernenbaus. Techn. Univ., Habil.-Schr.--Clausthal, 2009. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger-Verl. 2010.
- [93] *Neglia, S.*: Migration of fluids in sedimentary basins. AAPG Bull (1979), S. 573–597.
- [94] *Wolf, M.*: Nagra – Technischer Bericht 89-14. Mikrobieller Abbau von Bitumen. April 1989.
- [95] *Malárics, V.*: Ermittlung der Betonzugfestigkeit aus dem Spaltzugversuch an zylindrischen Betonproben. KIT, Diss.--Karlsruhe, 2010. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2011.
- [96] *Skalny, J. P., Mindess, S.*: Materials science of concrete, Vol.III. American Ceramic Society, Westerville. 1991.
- [97] Jobmann, M., et. al.: (2016): Projekt CHRISTA – Machbarkeitsstudie zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland. FKZ: 02E11375A/B.
- [98] Baltes, B.; Kindt, A.; Röhlig, K.-J.: Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk - Vorschlag der GRS; Juli 2003, GRS-A-3110.
- [99] Buhmann, D., Heusermann, S., Bollingerfehr, W., et. al.: Zusammenfassender Abschlussbericht: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW. ISIBEL. April 2008. FKZ 02E10065+02E10055.
- [100] Müller-Hoeppe, N., et. al: Funktionsnachweis für Schachtverschlüsse für HAW-Endlager am Beispiel VSG. Präsentation. ELSA-Workshop. Peine. 19.09.2012.
- [101] Heydorn, M., Teichmann, L., Meyer, T.: Schachtanlage Asse II – Anwendungsversuch Pilotströmungsbarriere PSB A1. Bergbau. April 2016.
- [102] Hölzer, W.: Die Bodenverfestigung feinkörniger, bindiger Böden durch Zusatz von Wasserglas-Soda-Gemischen. Untersuchungen an der Bodenfließgrenze. Dissertation, 2000
- [103] Joosten, H.J.: Das Joosten-Verfahren zur chemischen Bodenverfestigung und Abdichtung in seiner Entwicklung und Anwendung von 1925 bis heute. Joosten-Verlag, Harlem, 1953.

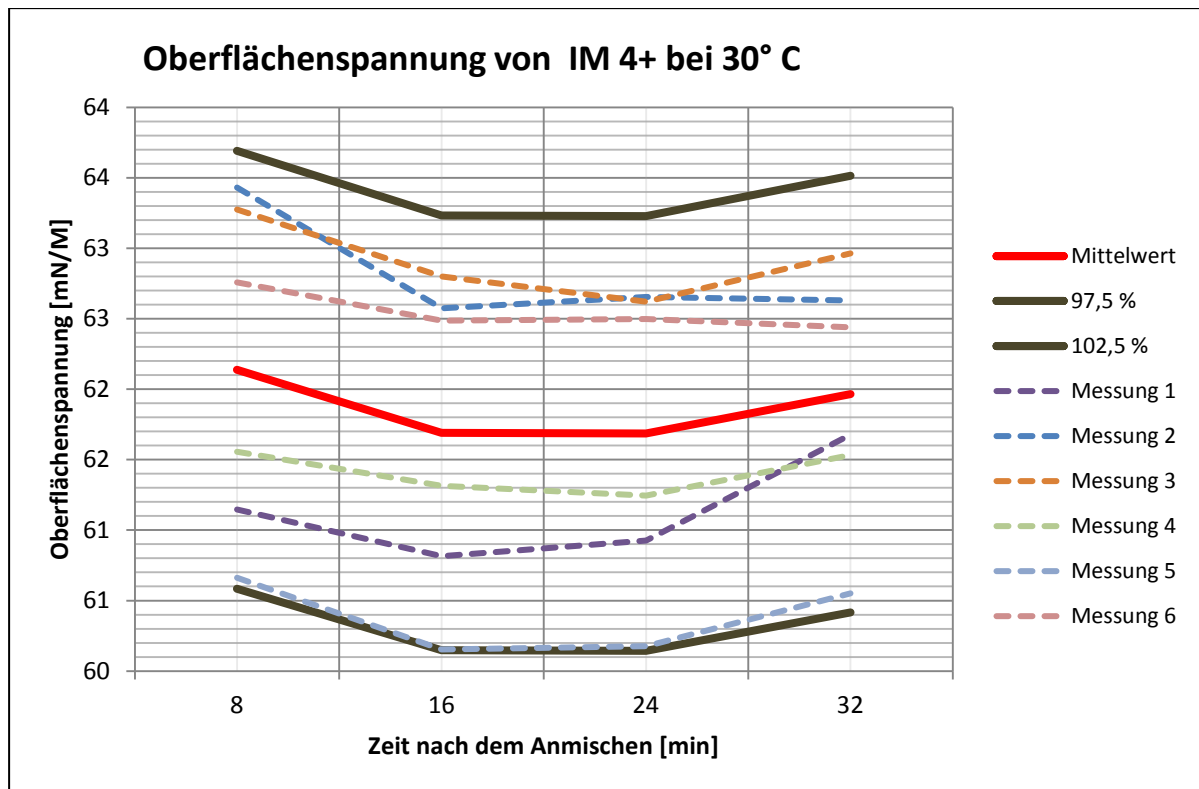
- [104] Tsang, C.-F., Bernier, F., Davis, C.: Geohydromechanical Processes in the Excavation Damaged Zone in Crystalline Rock, Rock Salt, and Indurated and Plastic Clays. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, June 2004.
- [105] Rothfuchs, T., Wieczorek, K.: Lessons Learned in Salt. In Impact of the excavation damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories. Proceedings of n European Commission Cluster Conference and Workshop in Luxembourg, 3 to 5 November 2003. P. 101-111.
- [106] Friedel, T.: Numerical simulation of production from tight-gas reservoirs by advanced stimulation technologies. Freiberg, TU Bergakademie, Dissertation 2004.
- [107] Heusermann, S.: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. AP 4: Nachweis der Integrität der geologischen Barriere. September 2007.
- [108] Kreienmeyer, M., Lerch, Ch., Polster, M., Tholen. M.: Überprüfung und Bewertung eines Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW ISIBEL. AP5: Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren. April 2008. FKZ 02 E 10065.
- [109] Seher, H., Bracke, G.: Chemische Vorgänge in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle im Ton- und Salzgestein. Synthesebericht. September 2012. GRS – 301. ISBN 978-3-939355-80-9.
- [110] GRS, AF-Consult Switzerland GmbH (2016): Bewertung Geplanten Versatzinjektionen von Natronwassergläsern in den Salzversatz in der Schachtanlage Asse II. BFS-KZL: 9A/342160000/GH/RZ/0027/00. Stand 30.01.2016.

## Anhangsverzeichnis:

Anhang 1: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von IM 4+ bei 30° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt. ....	122
Anhang 2: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von IM 4+ bei 30° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte. ...	122
Anhang 3: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von IM 4+ bei 40° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt. ....	123
Anhang 4: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von IM 4+ bei 40° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte. ...	123
Anhang 5: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Ultrafin 12 bei 30° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt. ....	124
Anhang 6: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Ultrafin 12 bei 30° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte. ....	124
Anhang 7: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Ultrafin 12 bei 40° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt. ....	125
Anhang 8: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Ultrafin 12 bei 40° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte. ....	125
Anhang 9: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Wasserglas bei 30° C. ....	126
Anhang 10: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Wasserglas bei 30° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte. ....	126
Anhang 11: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Wasserglas bei 40° C. ....	127
Anhang 12: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Wasserglas bei 40° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte. ....	127
Anhang 13: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Denepox 40 bei 30° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt. ....	128
Anhang 14: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Denepox 40 bei 30° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte. ....	128
Anhang 15: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Denepox 40 bei 40° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt. ....	129
Anhang 16: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Denepox 40 bei 40° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte. ....	129

Anhang 17: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung des 2K-Bitumens bei 30° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt. ....	130
Anhang 18: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung des 2K-Bitumens bei 30° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.....	130
Anhang 19: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Ultrafin 12 bei 30 °C.....	131
Anhang 20: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Ultrafin 12 bei 40 °C.....	131
Anhang 21: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Ultrafin 12 mit 90% NaCl-gesättigter Lösung bei 30 °C. ....	132
Anhang 22: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Ultrafin 12 mit 90% NaCl-gesättigter Lösung bei 40 °C. ....	132
Anhang 23: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von IM 4+ bei 30 °C.....	133
Anhang 24: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von IM 4+ bei 40 °C.....	133
Anhang 25: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Wasserglas 37/40 bei 30 °C.....	134
Anhang 26: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Wasserglas 37/40 bei 40 °C.....	134
Anhang 27: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Denepox 40 bei 30 °C.....	135
Anhang 28: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Denepox 40 bei 40 °C.....	135
Anhang 29: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung des 2K-Bitumens bei 30 °C.....	136
Anhang 30: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von IM 4+ bei 30° C.....	136
Anhang 31: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von IM 4+ bei 40° C.....	137
Anhang 32: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Ultrafin 12 bei 30° C.....	137
Anhang 33: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Ultrafin 12 bei 40° C.....	138
Anhang 34: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung der mit 90% NaCl gesättigter Lösung angemischter Ultrafin 12 Suspension bei 30° C.....	138
Anhang 35: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung der mit 90% NaCl gesättigter Lösung angemischter Ultrafin 12 Suspension bei 40° C.....	139
Anhang 36: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung des 2K-Bitumens bei 30° C.....	139
Anhang 37: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Wasserglas bei 30° C.....	140
Anhang 38: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Wasserglas bei 40° C.....	140
Anhang 39: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Denepox 40 bei 30° C.....	141
Anhang 40: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Denepox 40 bei 40° C.....	141
Anhang 41: Häufigkeitsverteilung der Kontaktwinkelmessungen mit dem Injektionsharz Denepox 40 bei 30° und 40° C. ....	142
Anhang 42: Häufigkeitsverteilung der Kontaktwinkelmessungen mit dem Feinstmagnesiabinder IM 4+ bei 30° und 40° C. ....	142

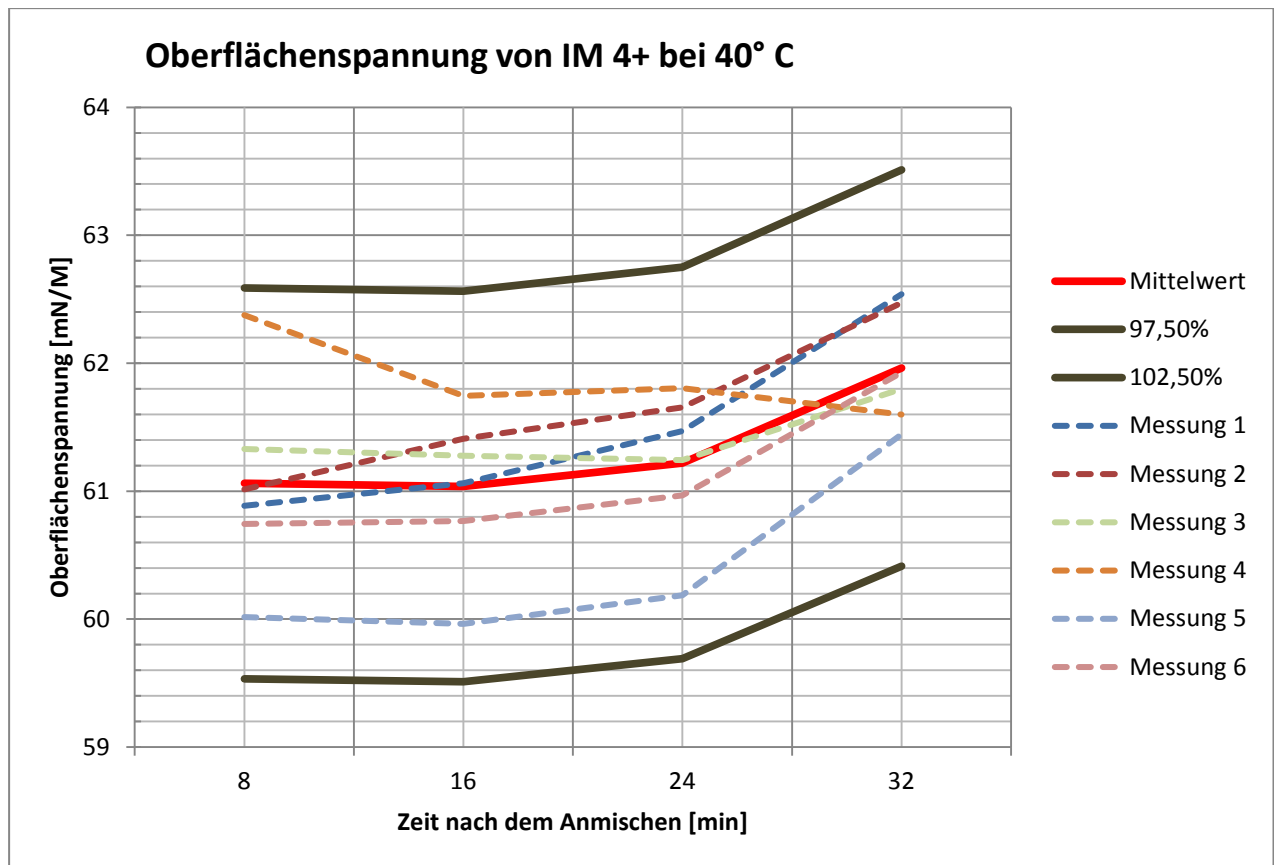
Anhang 43: Häufigkeitsverteilung der Kontaktwinkelmessungen mit dem 2K-Bitumen bei 30° und 40° C.....	143
Anhang 44: Tabellarische Auswertung der mit Wasserglas injizierten bGZ-Salzbeton Probenkörper (Nr. 9,10,12 und 16) .....	144
Anhang 45: Tabellarische Auswertung der mit Ultrafin 12 injizierten bGZ-Salzbeton Probenkörper (Nr. 2,7,14 und 17) .....	147
Anhang 46: Tabellarische Auswertung der mit Wasserglas injizierten Magnesiabinder MB10 Probenkörper (Nr. 1,4,13 und 18) .....	150
Anhang 47: Tabellarische Auswertung der mit Ultrafin 12 injizierten Magnesiabinder MB10 Probenkörper (Nr.3,8,11 und 19).....	153



Anhang 1: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von IM 4+ bei 30° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt.

Zeitpunkt	Oberflächen- spannung (Mittelwert)	Abweichung	Temperatur	Abweichung
8	62,138	± 0,019	30,19° C	± 0,02
16	61,690	± 0,019	30,23 ° C	± 0,02
24	61,686	± 0,019	30,14 ° C	± 0,02
32	61,966	± 0,019	30,09 ° C	± 0,02

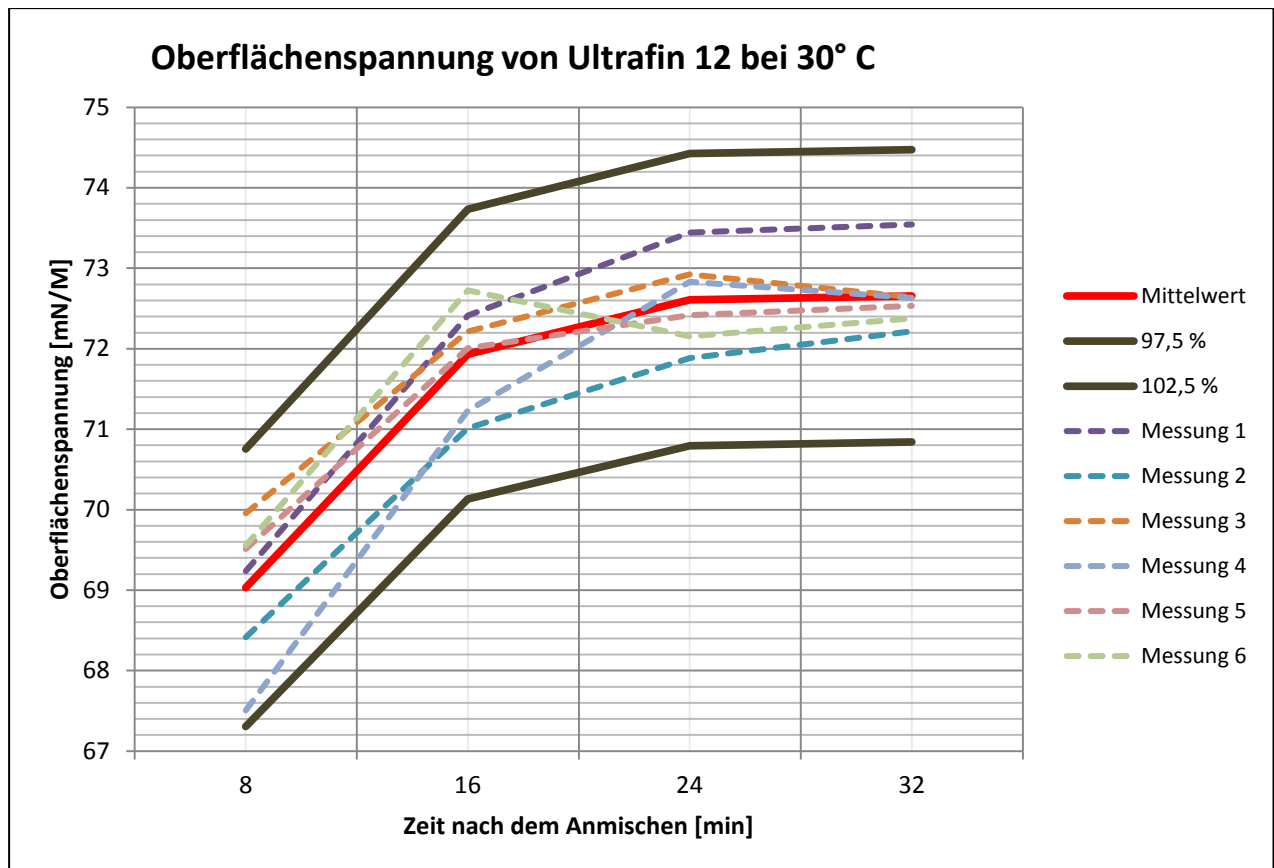
Anhang 2: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von IM 4+ bei 30° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.



Anhang 3: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von IM 4+ bei 40° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt.

Zeitpunkt	Oberflächen- spannung (Mittelwert)	Abweichung	Temperatur	Abweichung
8	61,061	± 0,019	40,13° C	± 0,02
16	61,037	± 0,021	40,12 ° C	± 0,02
24	61,221	± 0,019	40,15 ° C	± 0,02
32	61,963	± 0,019	40,08 ° C	± 0,02

Anhang 4: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von IM 4+ bei 40° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.

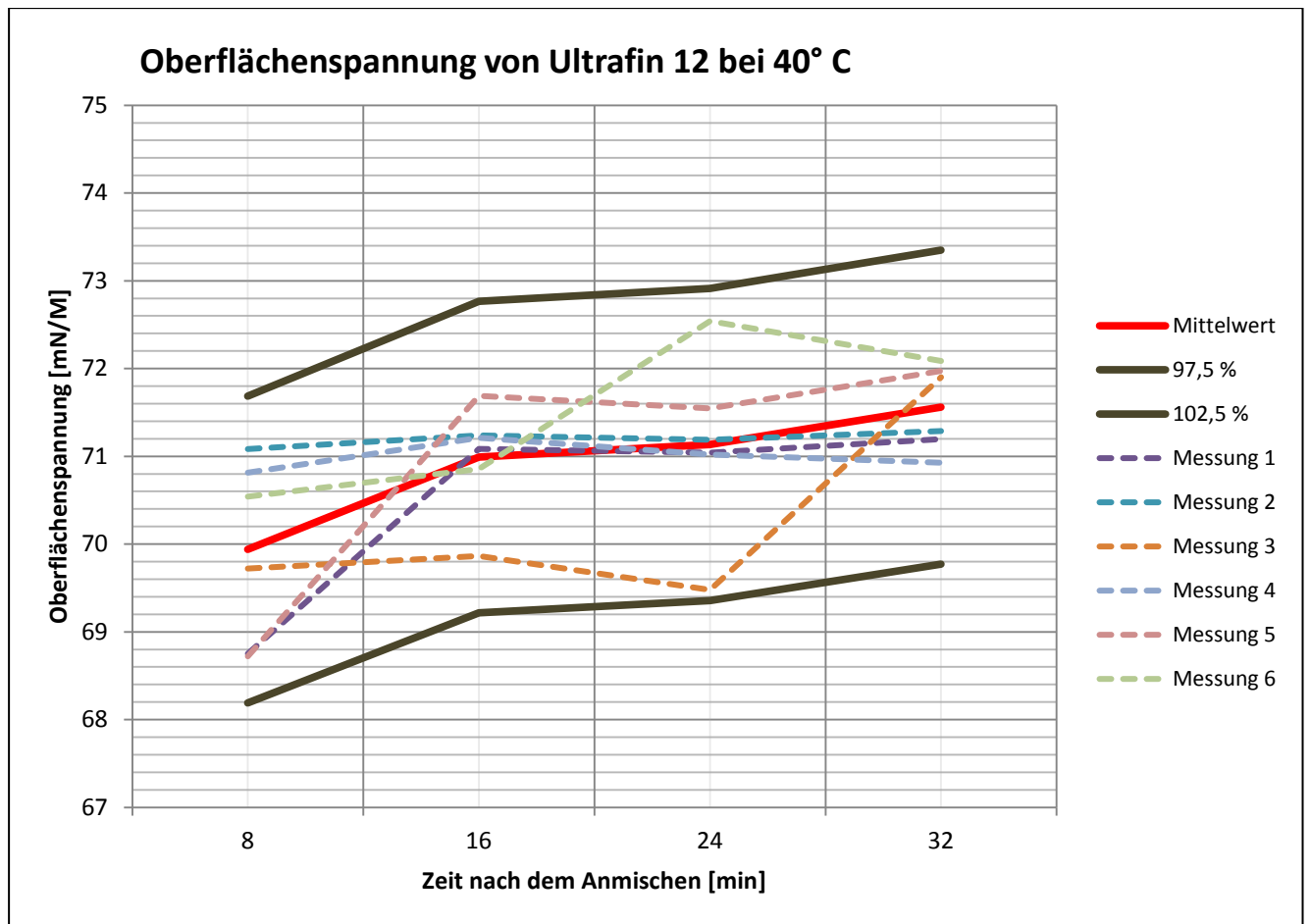


Anhang 5: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Ultrafin 12 bei 30° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt.

Zeitpunkt	Oberflächen- spannung (Mittelwert)	Abweichung	Temperatur	Abweichung
8	69,030	± 0,019	30,18 ° C	± 0,02
16	71,934	± 0,019	30,09 ° C	± 0,02
24	72,609	± 0,019	30,15 ° C	± 0,02
32	72,657	± 0,019	30,18 ° C	± 0,02

Anhang 6: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Ultrafin 12 bei 30° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.

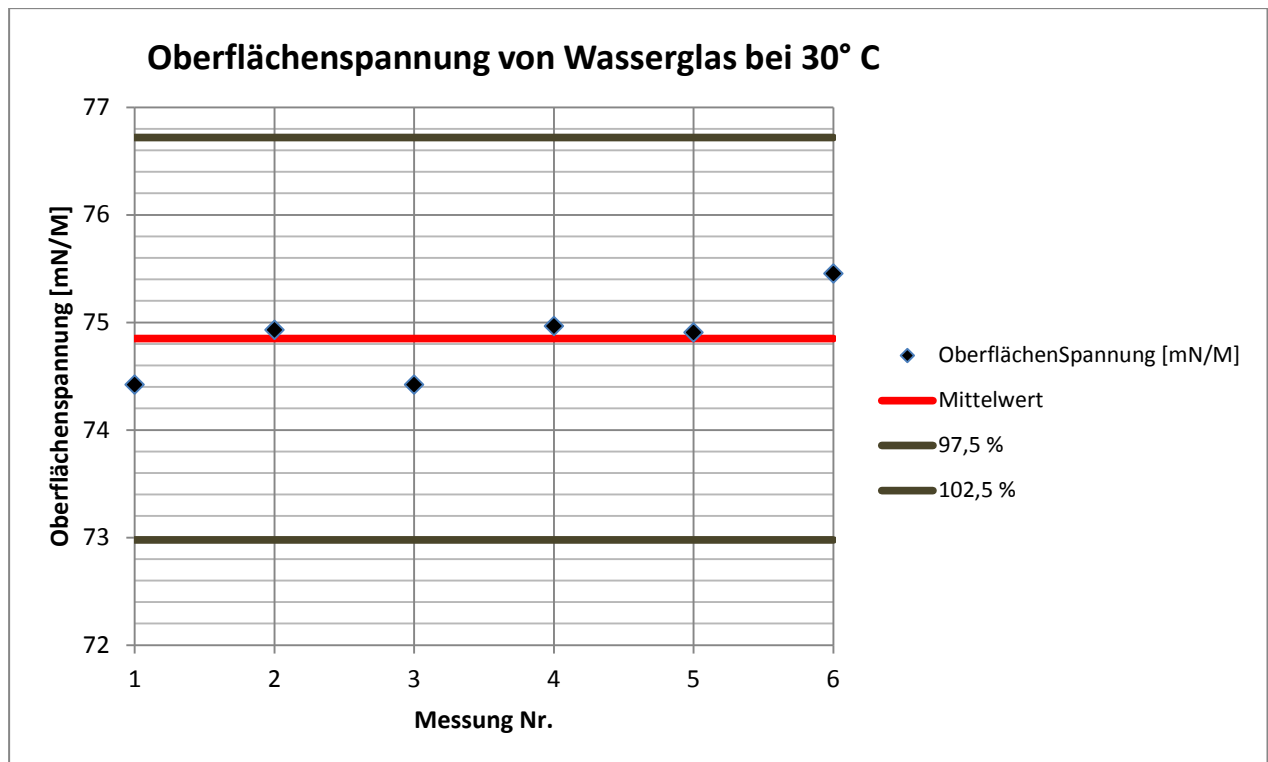




Anhang 7: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Ultrafin 12 bei 40° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt.

Zeitpunkt	Oberflächen- spannung (Mittelwert)	Abweichung	Temperatur	Abweichung
8	69,939	± 0,019	39,79 ° C	± 0,02
16	70,991	± 0,019	40,05 ° C	± 0,02
24	71,136	± 0,019	40,05 ° C	± 0,02
32	71,562	± 0,019	40,09 ° C	± 0,02

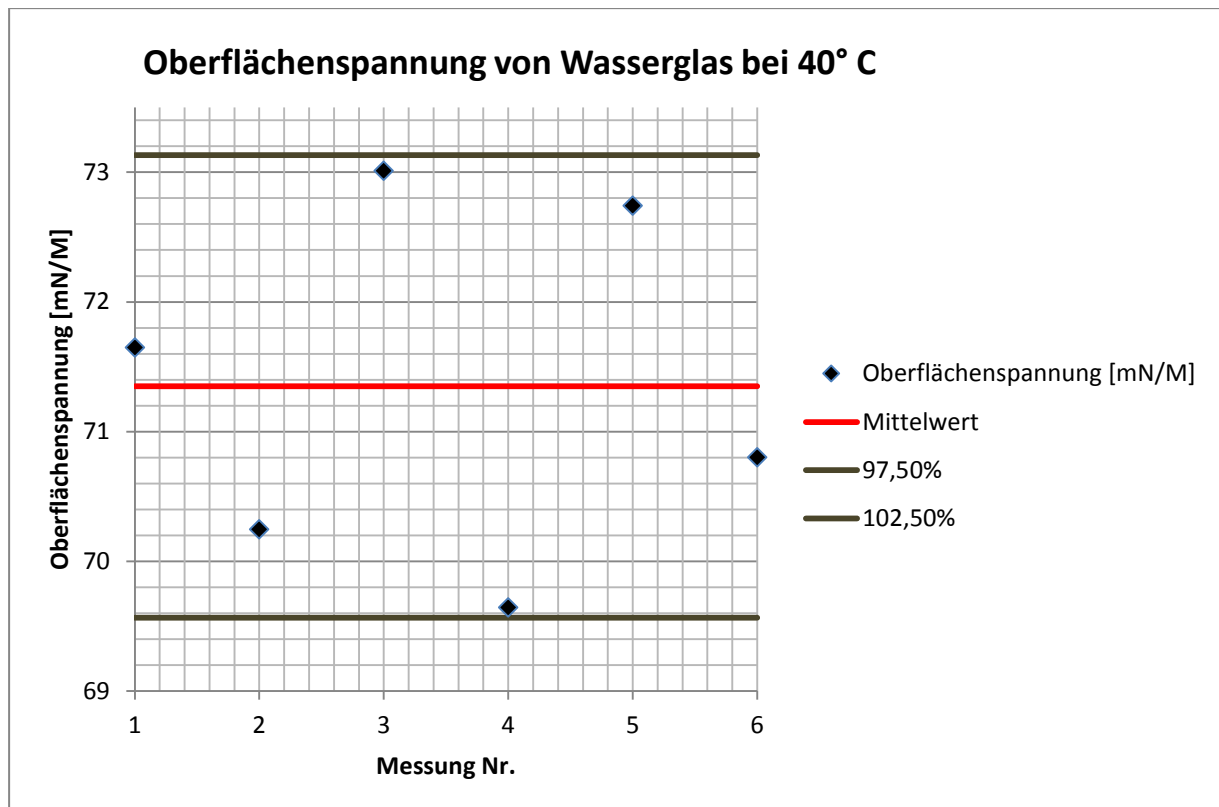
Anhang 8: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Ultrafin 12 bei 40° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.



Anhang 9: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Wasserglas bei 30° C.

Messung Nr.	Oberflächen- spannung	Abweichung	Temperatur	Abweichung
1	74,420	± 0,016	29,87	± 0,03
2	74,930	± 0,014	30,09	± 0,02
3	74,421	± 0,017	30,01	± 0,03
4	74,965	± 0,018	30,11	± 0,01
5	74,906	± 0,017	30,09	± 0,01
6	75,454	± 0,019	30,10	± 0,02
<b>Mittelwert</b>	<b>74,849</b>	<b>± 0,017</b>	<b>30,05</b>	<b>± 0,02</b>

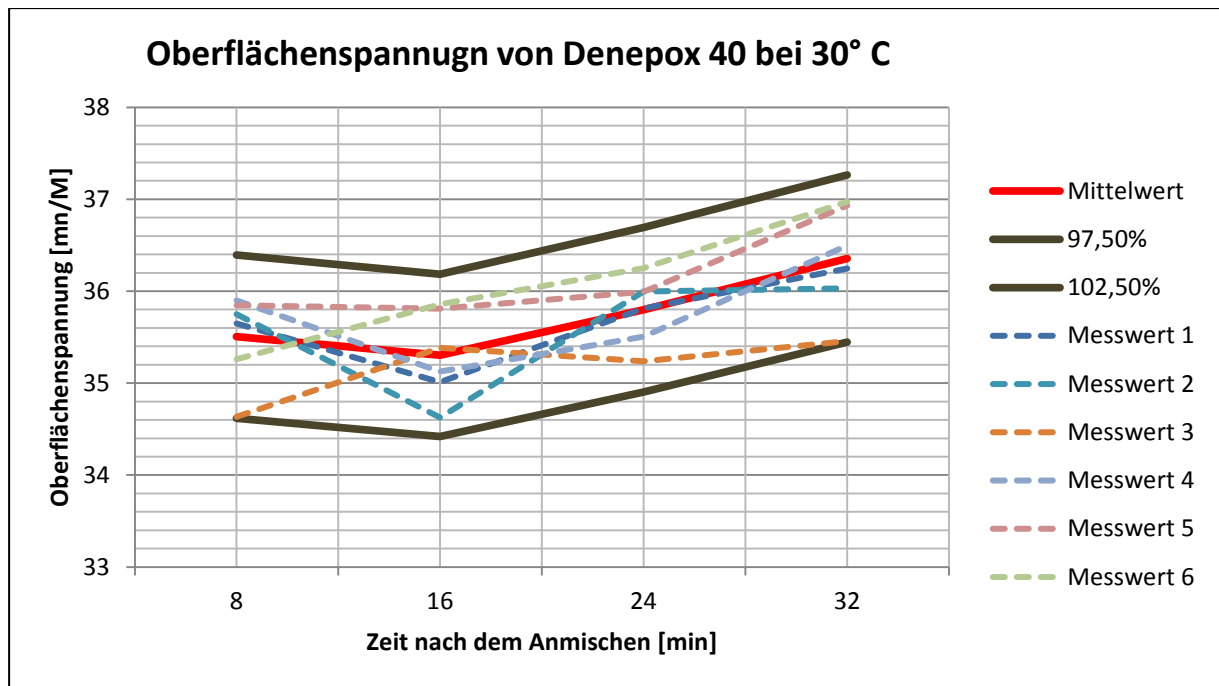
Anhang 10: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Wasserglas bei 30° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.



Anhang 11: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Wasserglas bei 40° C.

Messung Nr.	Oberflächen- spannung	Abweichung	Temperatur	Abweichung
1	71,649	± 0,019	40,17	± 0,02
2	70,247	± 0,019	39,40	± 0,03
3	73,012	± 0,020	39,91	± 0,01
4	69,645	± 0,018	40,49	± 0,02
5	72,741	± 0,018	40,66	± 0,03
6	70,801	± 0,019	39,32	± 0,02
<b>Mittelwert</b>	<b>71,349</b>	<b>± 0,019</b>	<b>40,09</b>	<b>± 0,02</b>

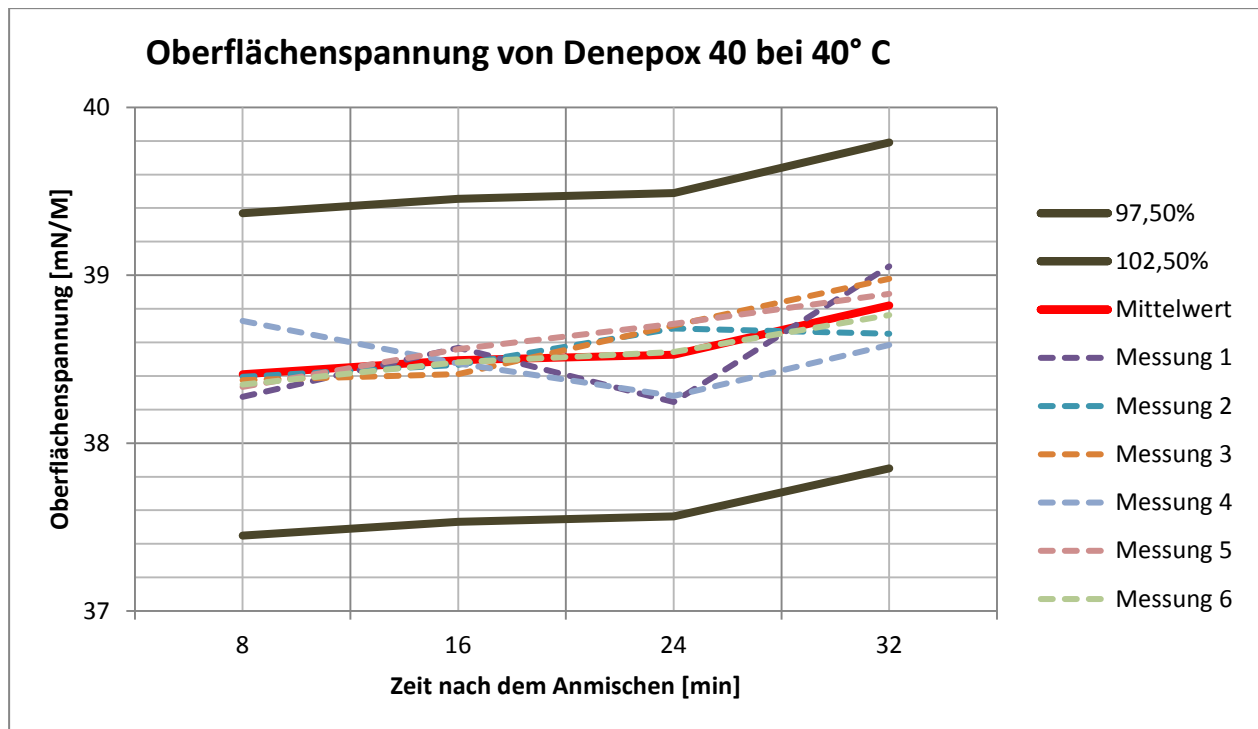
Anhang 12: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Wasserglas bei 40° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.



Anhang 13: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Denepox 40 bei 30° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt.

Zeitpunkt	Oberflächen- spannung (Mittelwert)	Abweichung	Temperatur	Abweichung
8	35,506	± 0,019	30,31° C	± 0,02
16	35,303	± 0,018	30,33° C	± 0,02
24	35,799	± 0,019	30,36 ° C	± 0,02
32	36,356	± 0,017	30,32 ° C	± 0,02

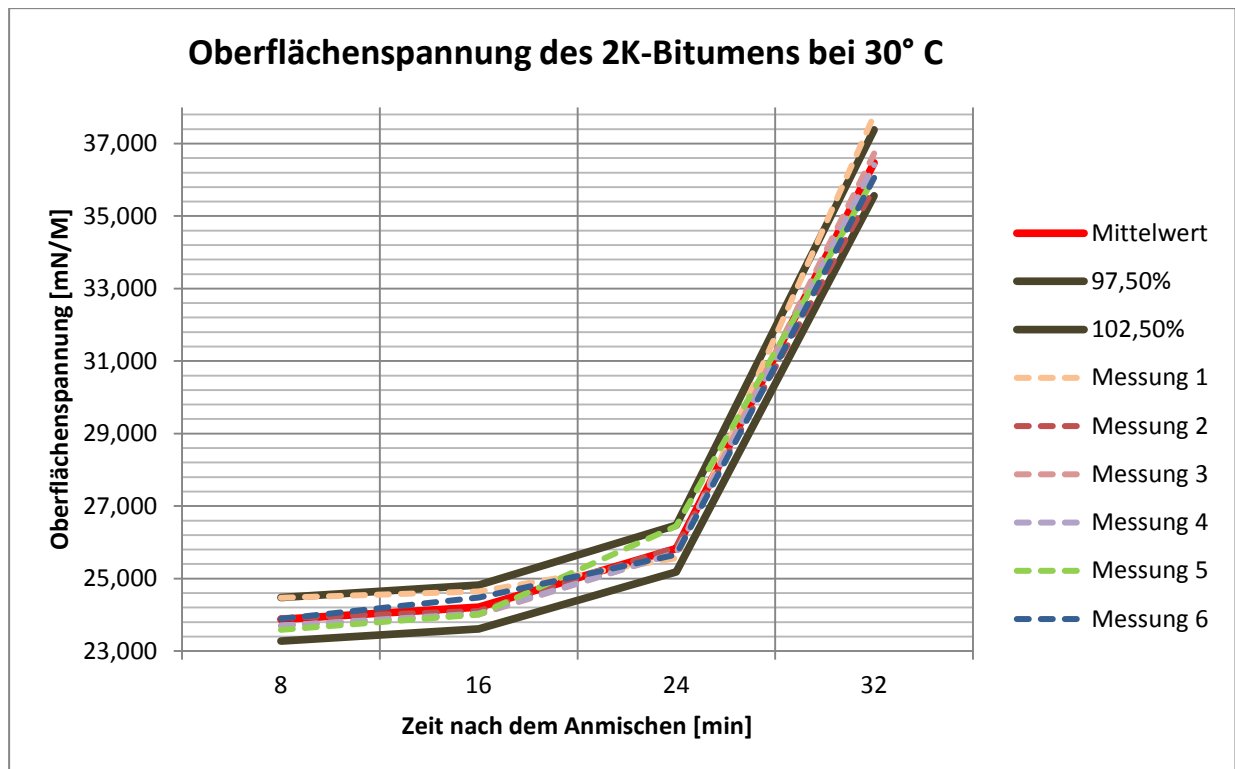
Anhang 14: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Denepox 40 bei 30° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.



Anhang 15: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung von Denepox 40 bei 40° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt.

Zeitpunkt	Oberflächen- spannung (Mittelwert)	Abweichung	Temperatur	Abweichung
8	38,410	± 0,019	39,66° C	± 0,02
16	38,493	± 0,019	40,05° C	± 0,02
24	38,527	± 0,019	40,06 ° C	± 0,02
32	38,820	± 0,019	40,29 ° C	± 0,02

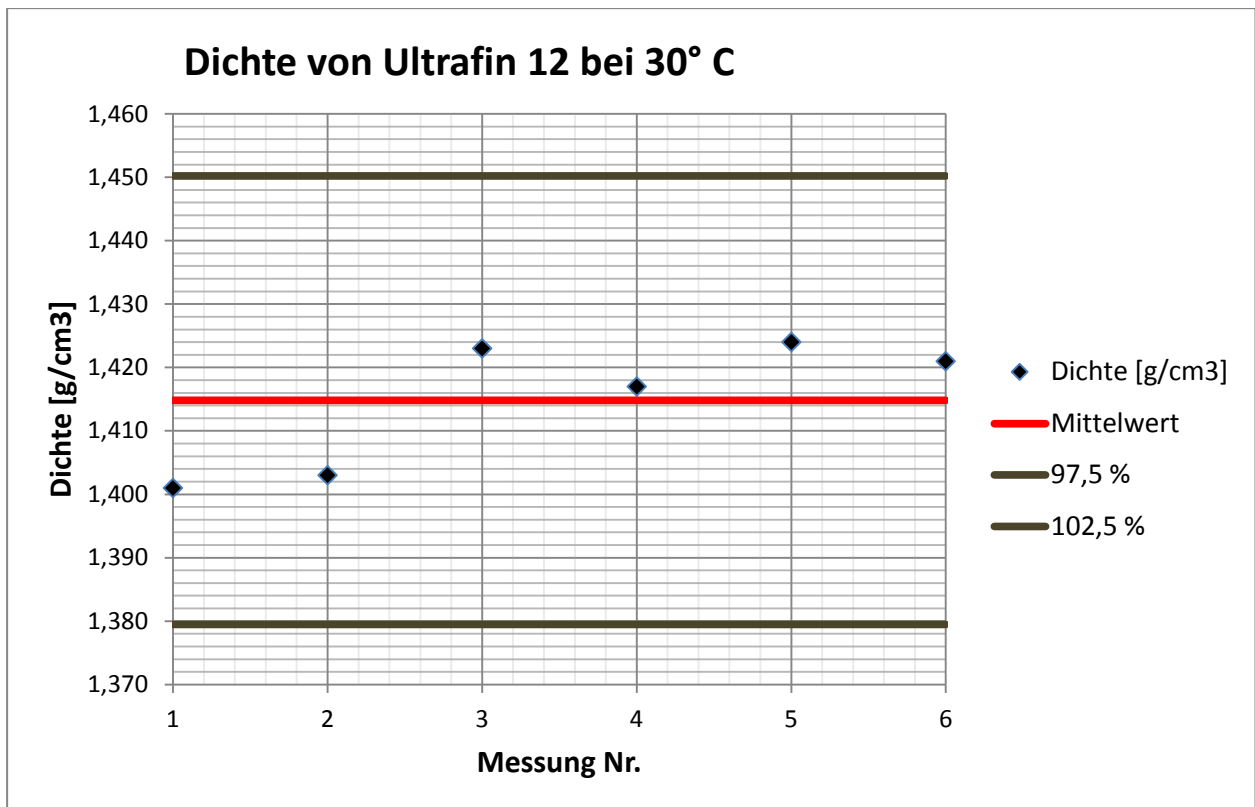
Anhang 16: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung von Denepox 40 bei 40° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.



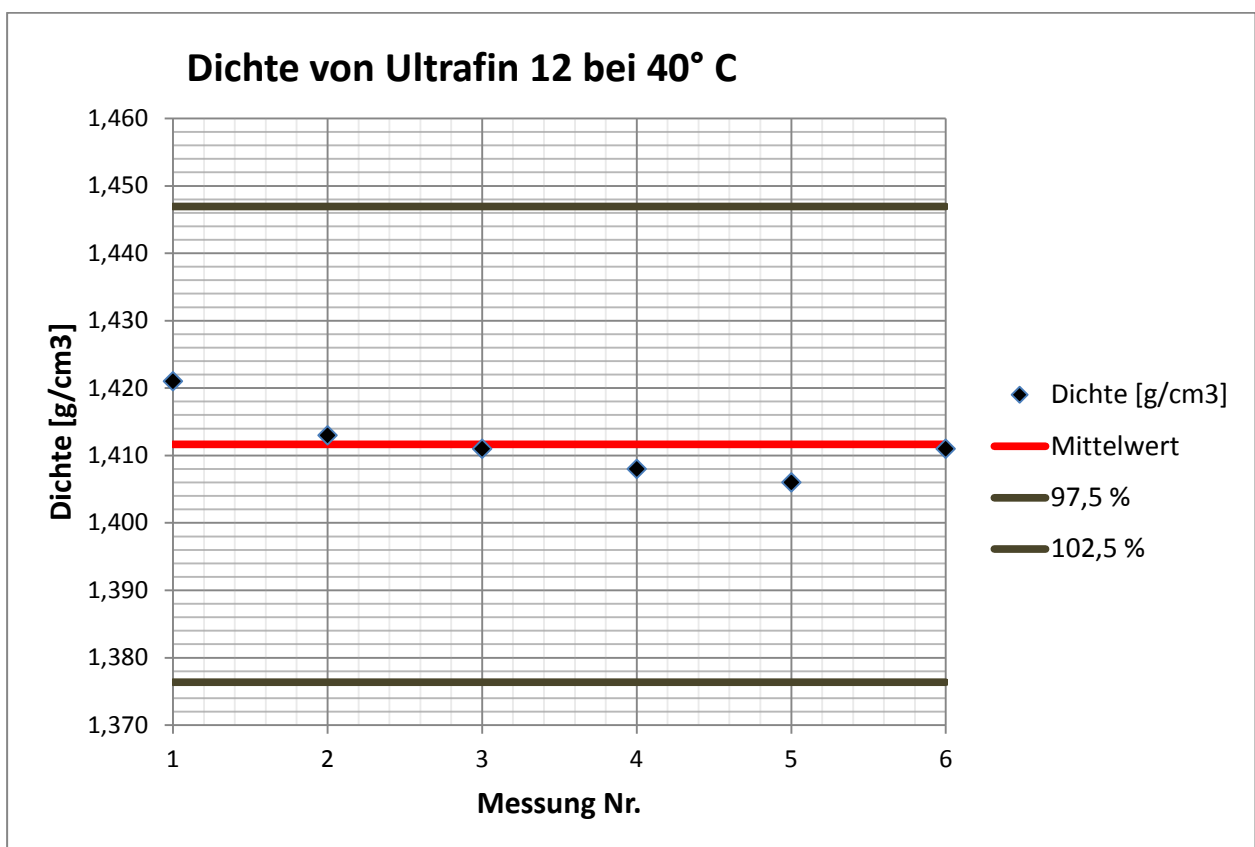
Anhang 17: Ergebnisse der Oberflächenspannungsmessung des 2K-Bitumens bei 30° C. Als gestrichelte Linien sind die Verläufe der einzelnen Messungen dargestellt.

Zeitpunkt	Oberflächen- spannung (Mittelwert)	Abweichung	Temperatur	Abweichung
8	23,876	± 0,019	30,24° C	± 0,02
16	24,213	± 0,020	30,27° C	± 0,02
24	25,824	± 0,019	30,43 ° C	± 0,02
32	36,470	± 0,018	30,47° C	± 0,02

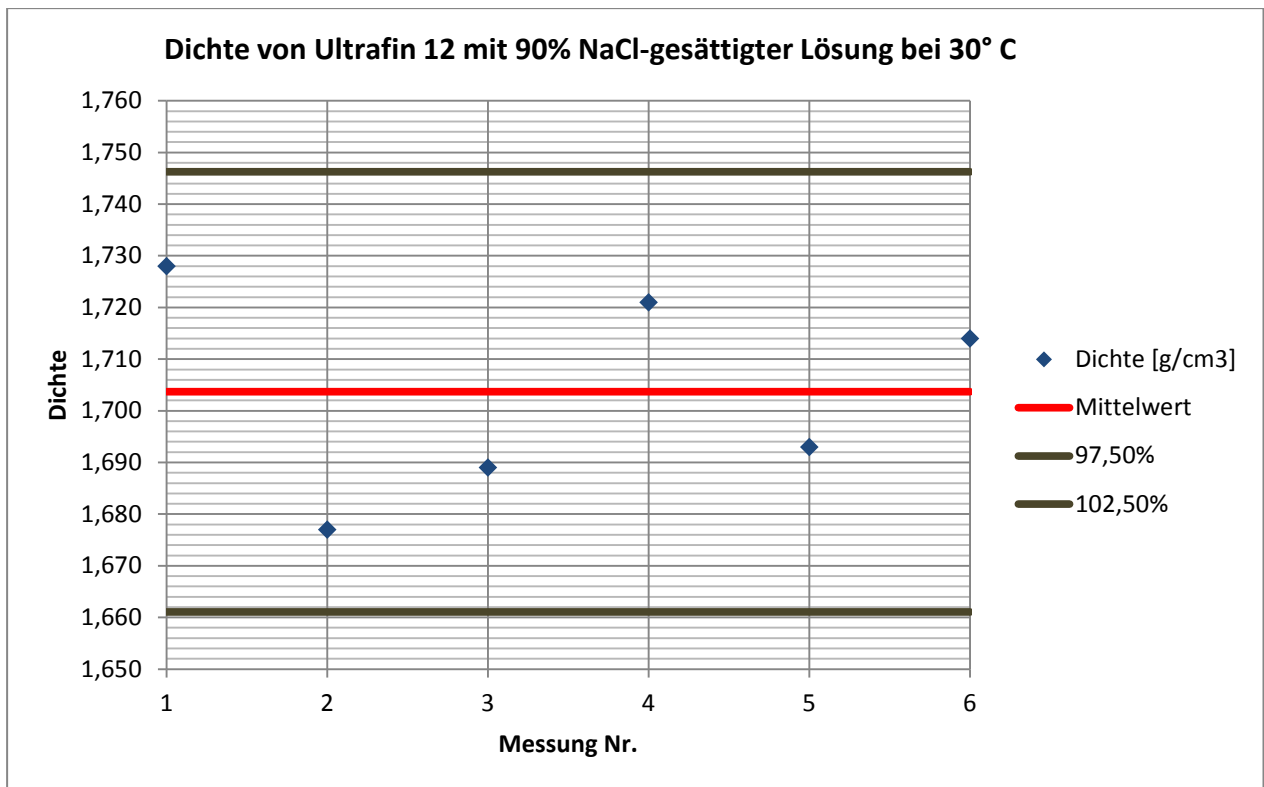
Anhang 18: Tabellarische Übersicht über die Mittelwerte der Oberflächenspannungsmessung des 2K-Bitumens bei 30° C inklusive der Fehler auf die Oberflächenspannung- und die Temperaturmesswerte.



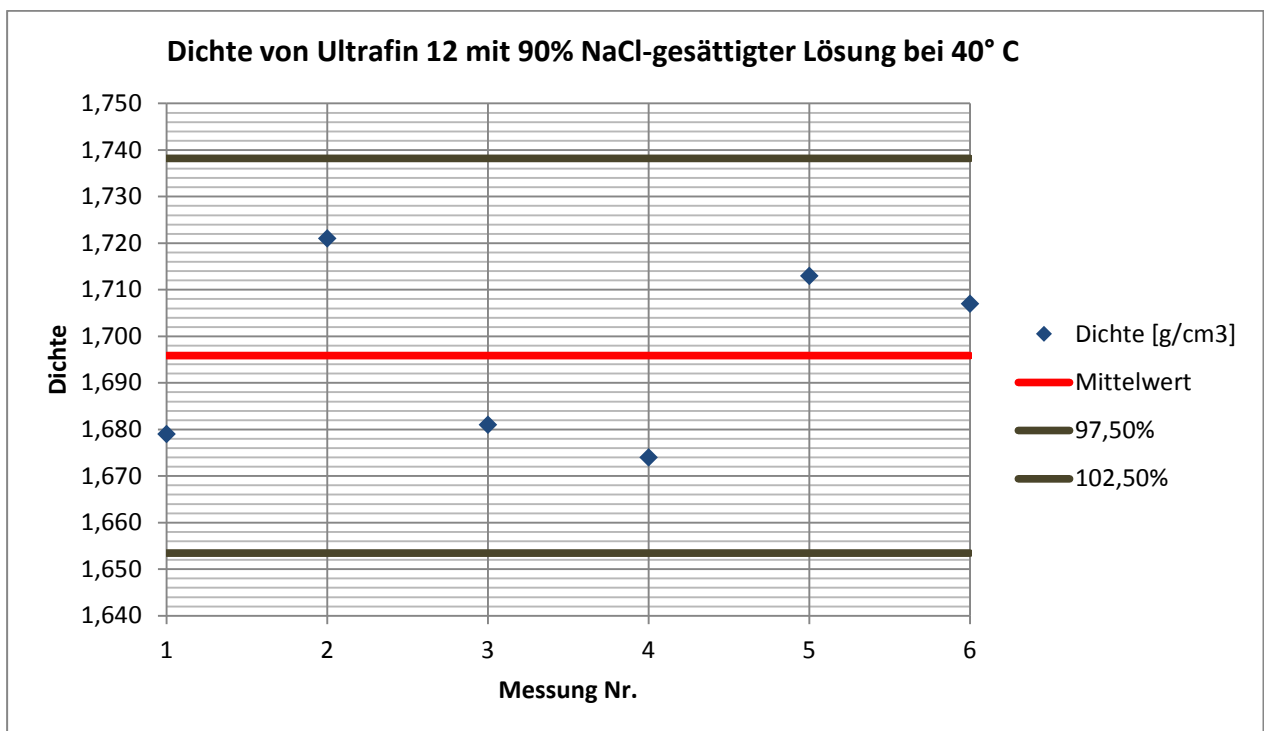
Anhang 19: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Ultrafin 12 bei 30 °C



Anhang 20: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Ultrafin 12 bei 40 °C.

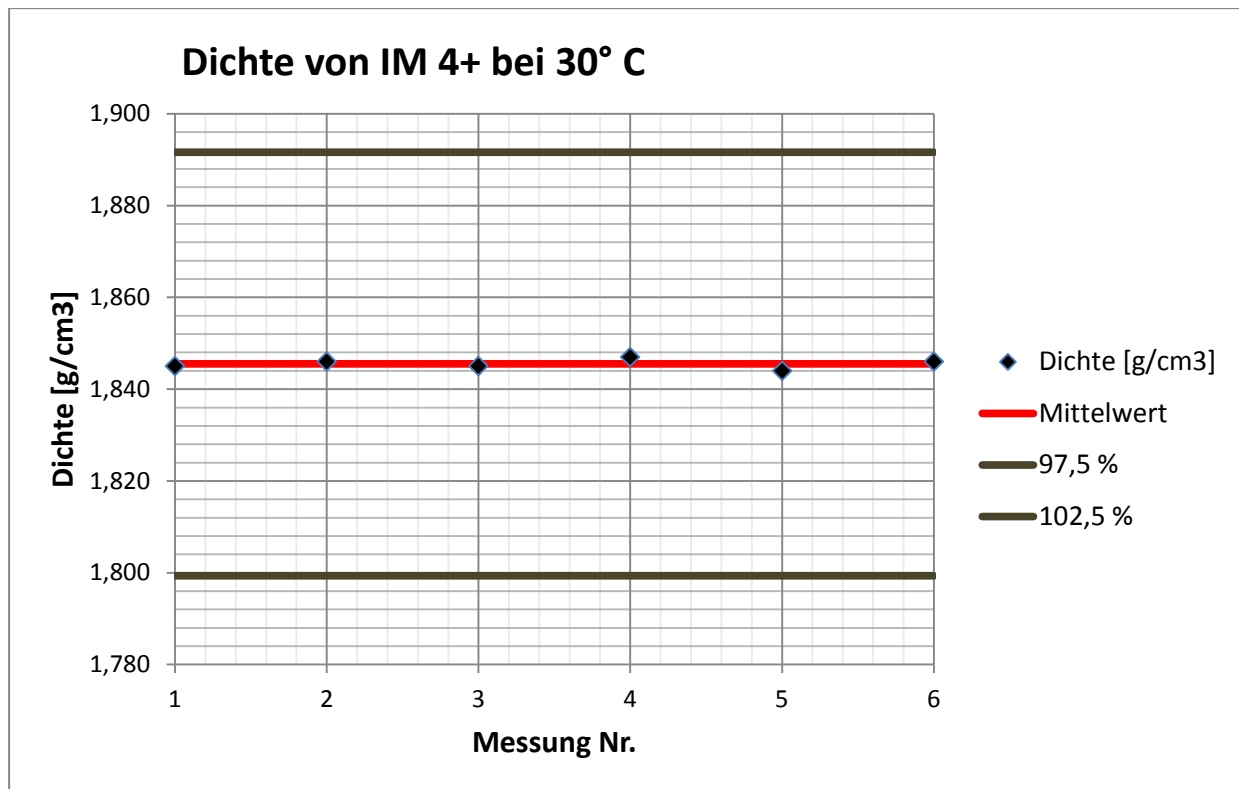


Anhang 21: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Ultrafin 12 mit 90% NaCl-gesättigter Lösung bei 30 °C.

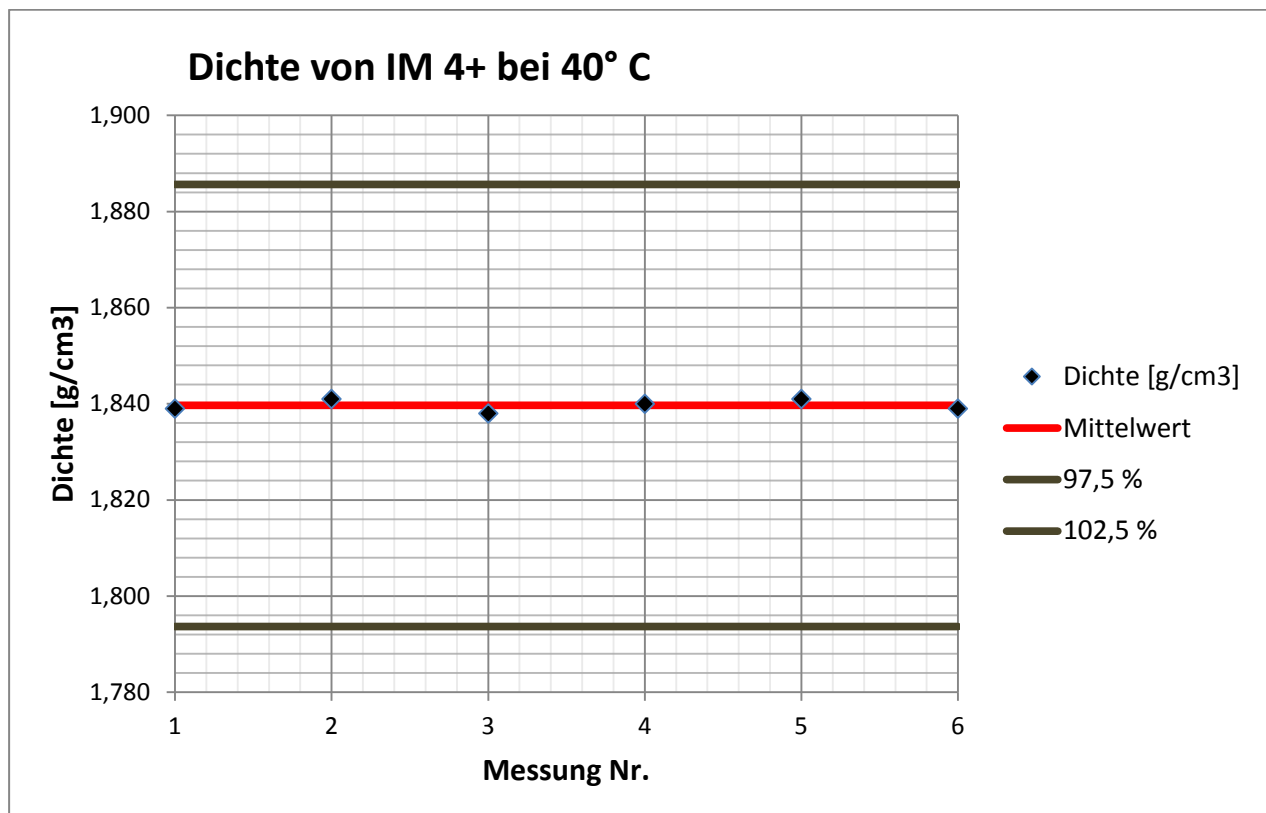


Anhang 22: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Ultrafin 12 mit 90% NaCl-gesättigter Lösung bei 40 °C.

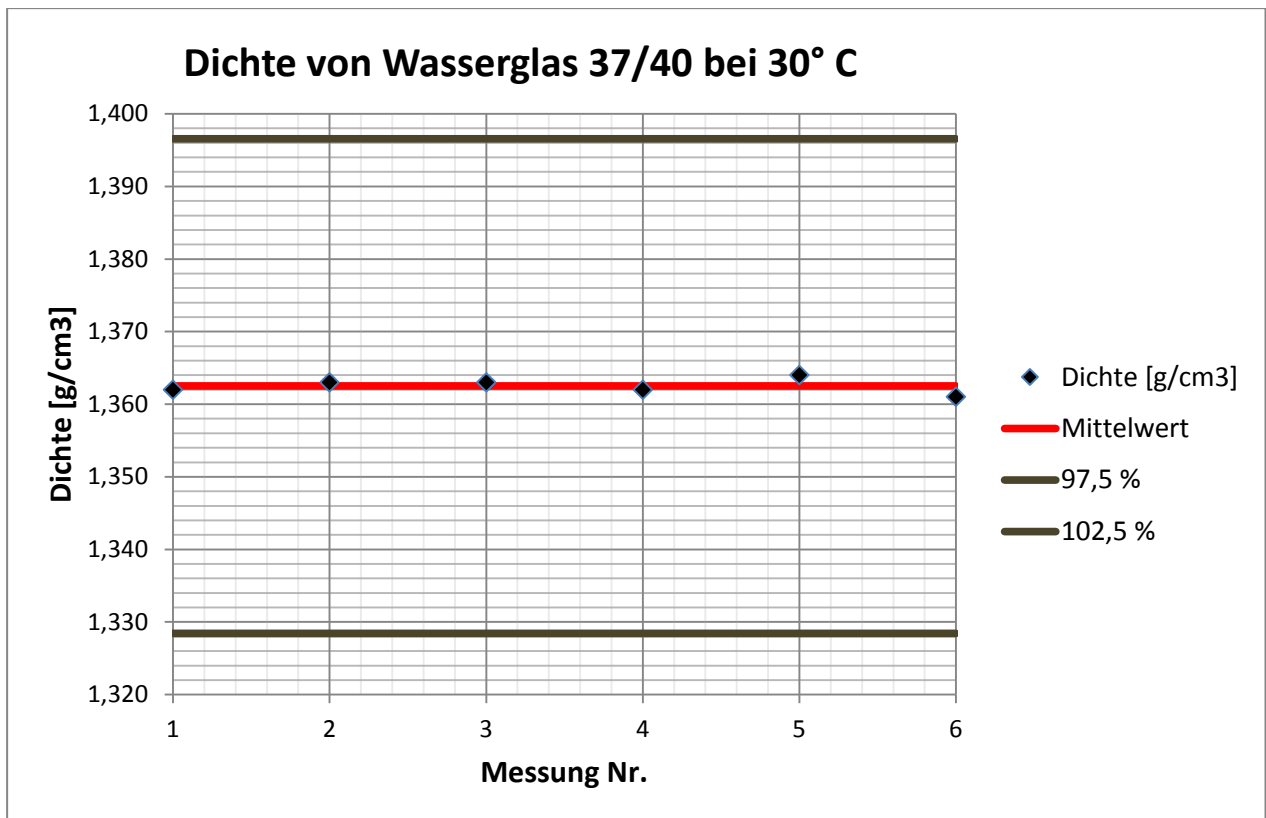




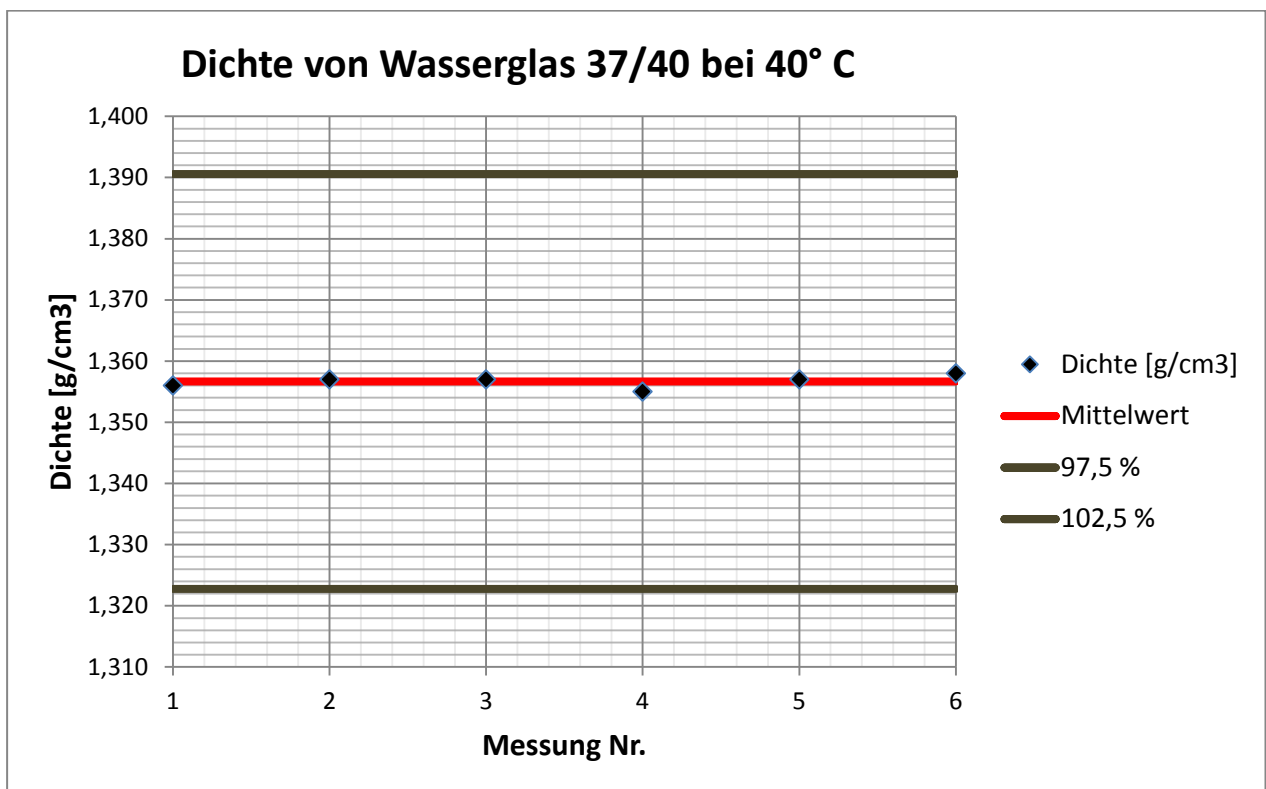
Anhang 23: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von IM 4+ bei 30 °C.



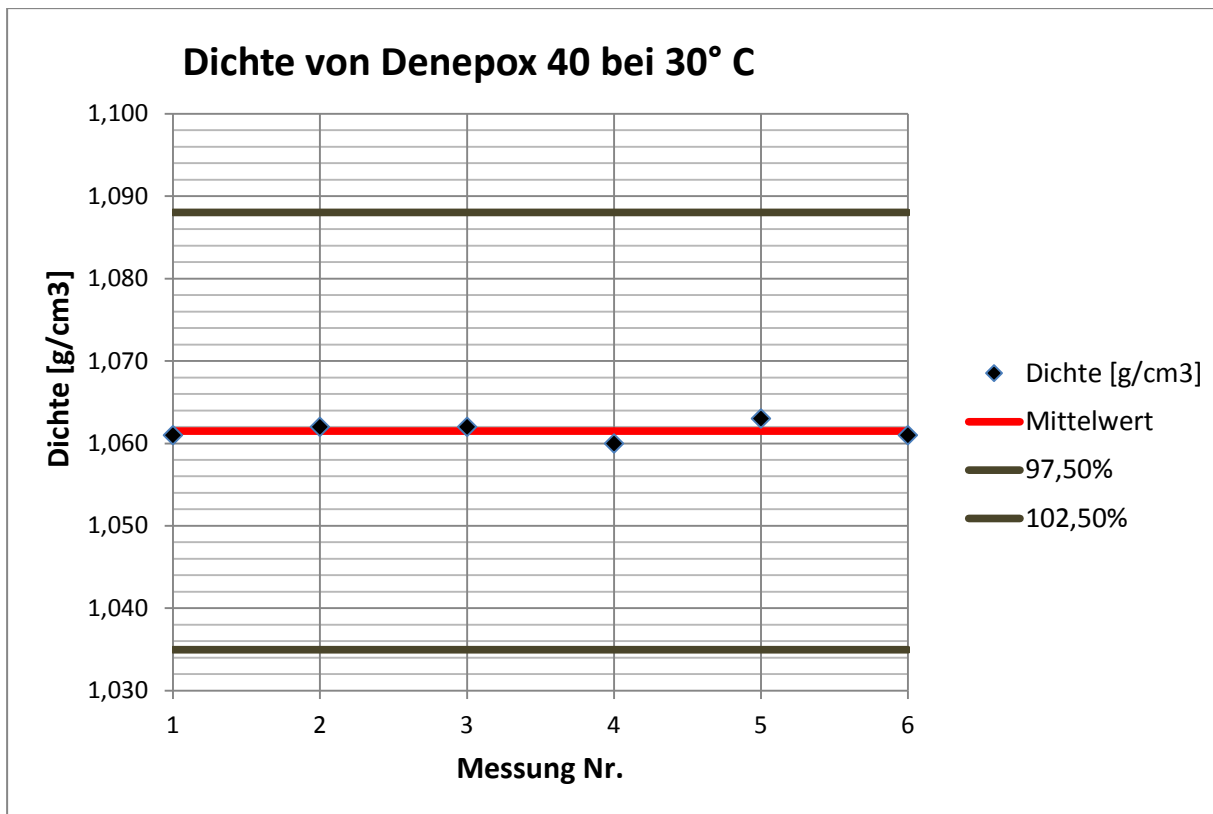
Anhang 24: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von IM 4+ bei 40 °C.



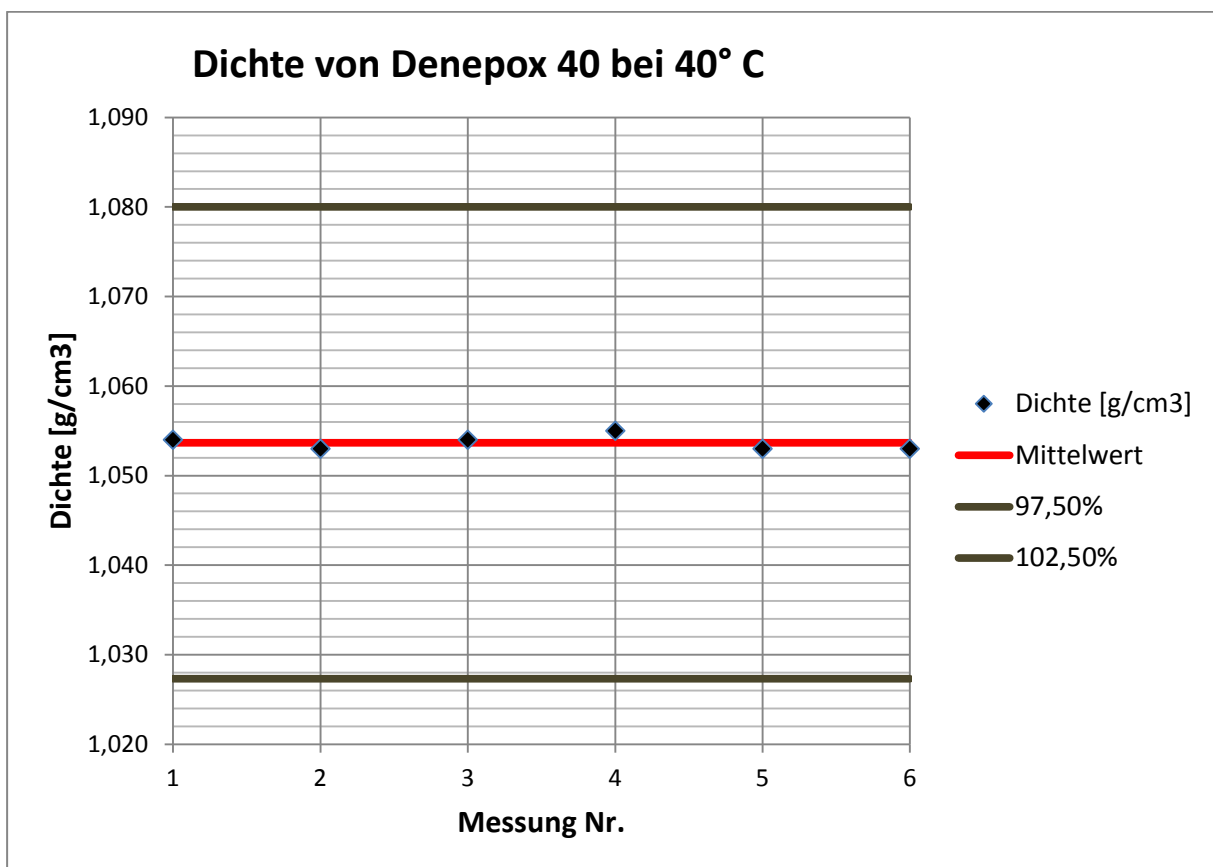
Anhang 25: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Wasserglas 37/40 bei 30 °C



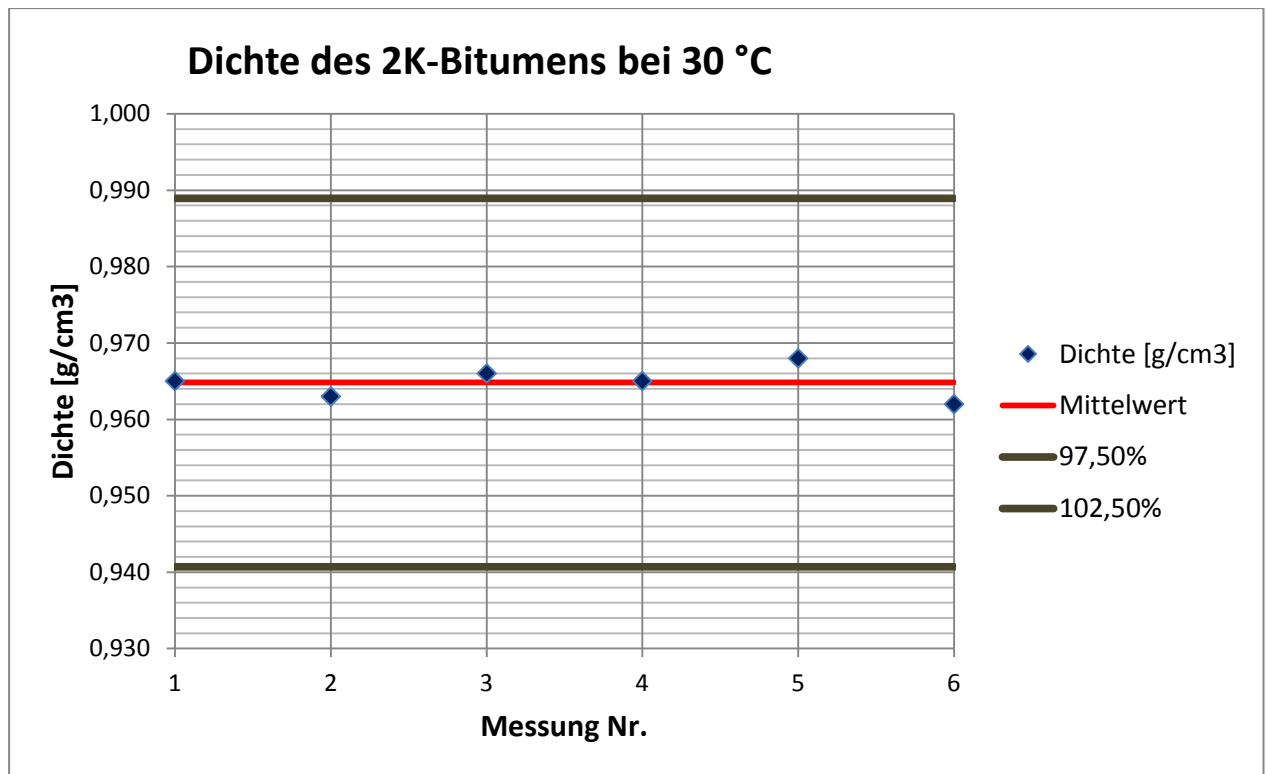
Anhang 26: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Wasserglas 37/40 bei 40 °C



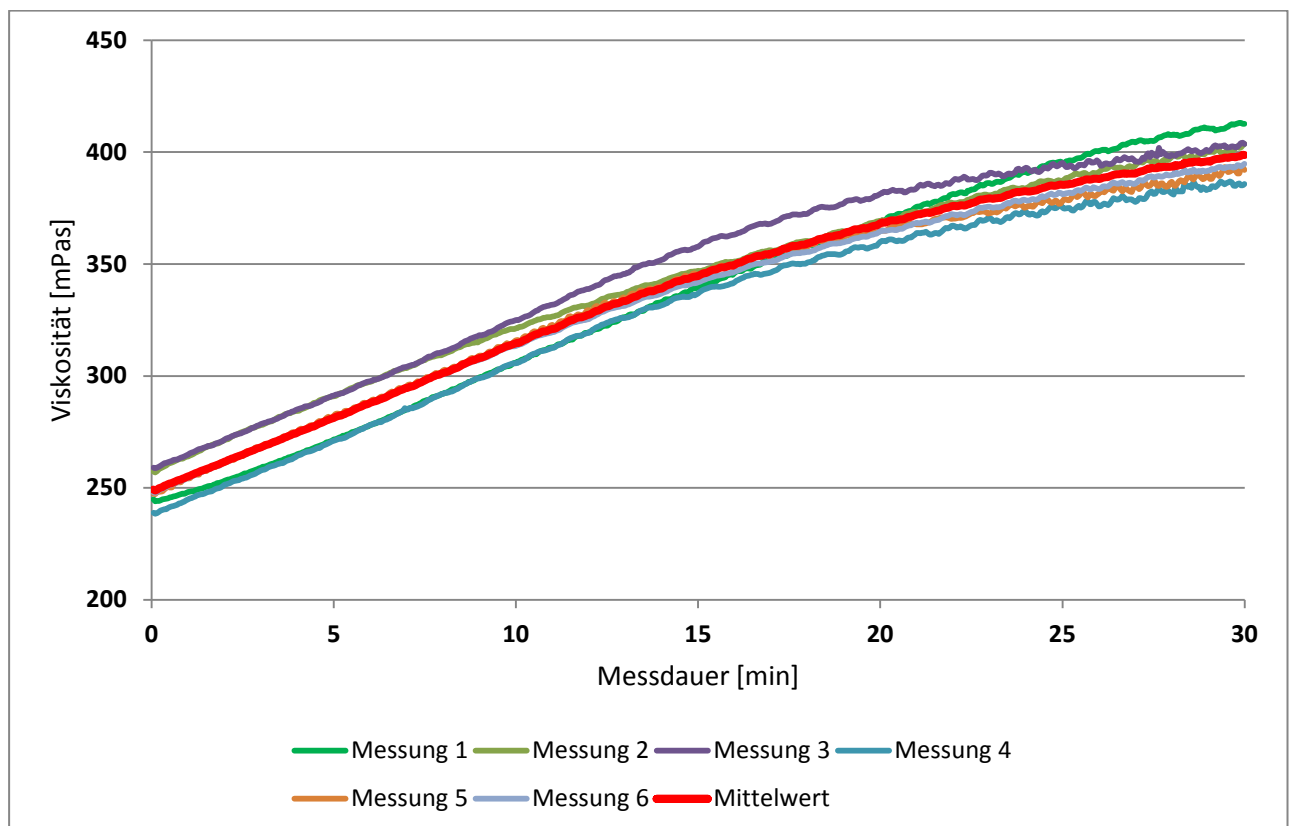
Anhang 27: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Denepox 40 bei 30 °C



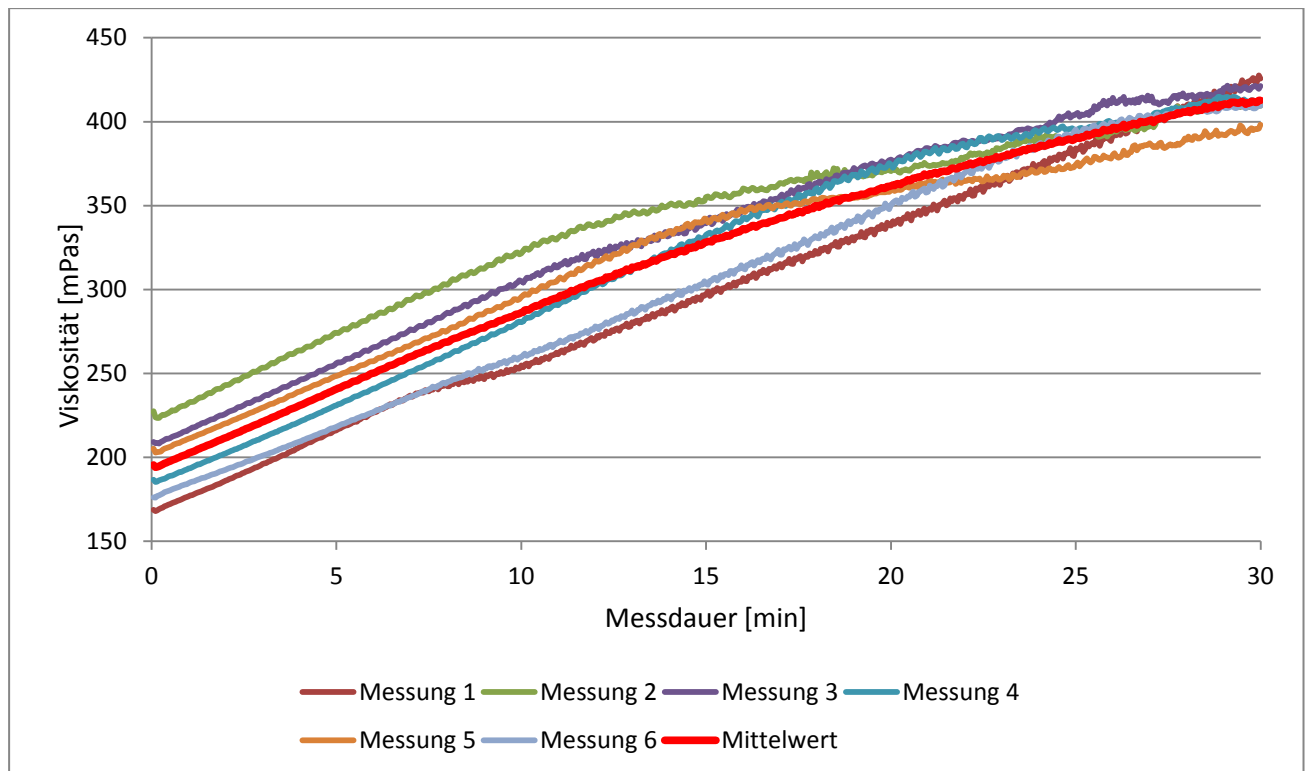
Anhang 28: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung von Denepox 40 bei 40 °C



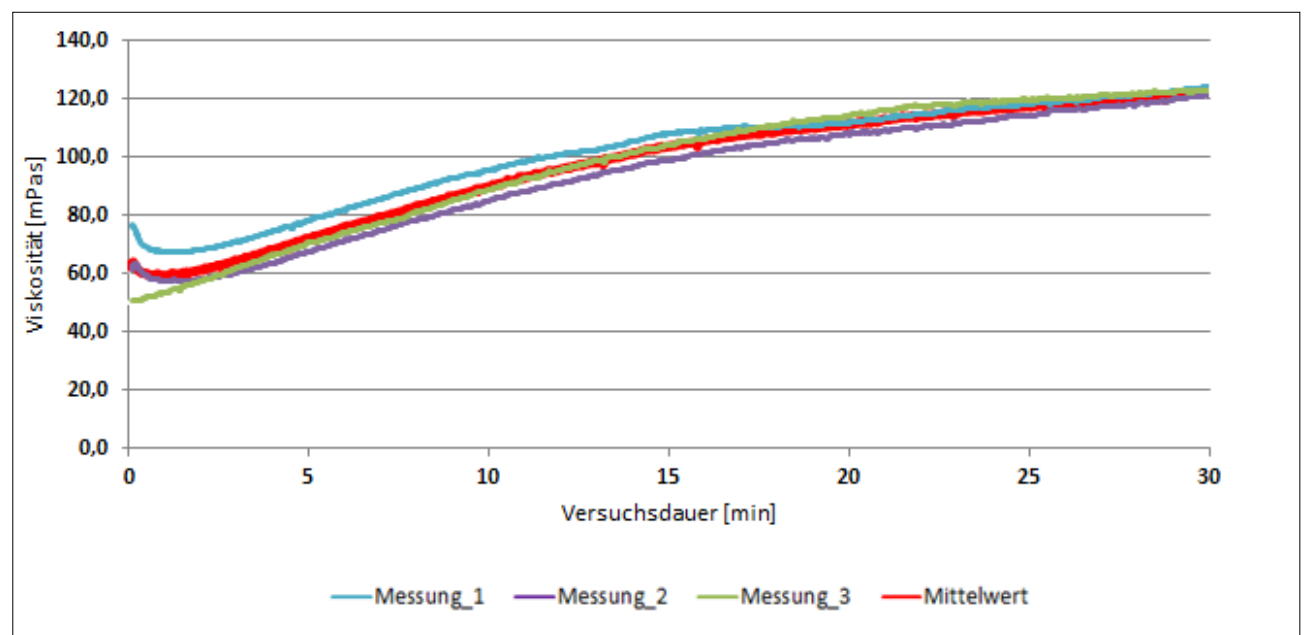
Anhang 29: Messwerte und Mittelwert der Dichtemessung des 2K-Bitumens bei 30 °C



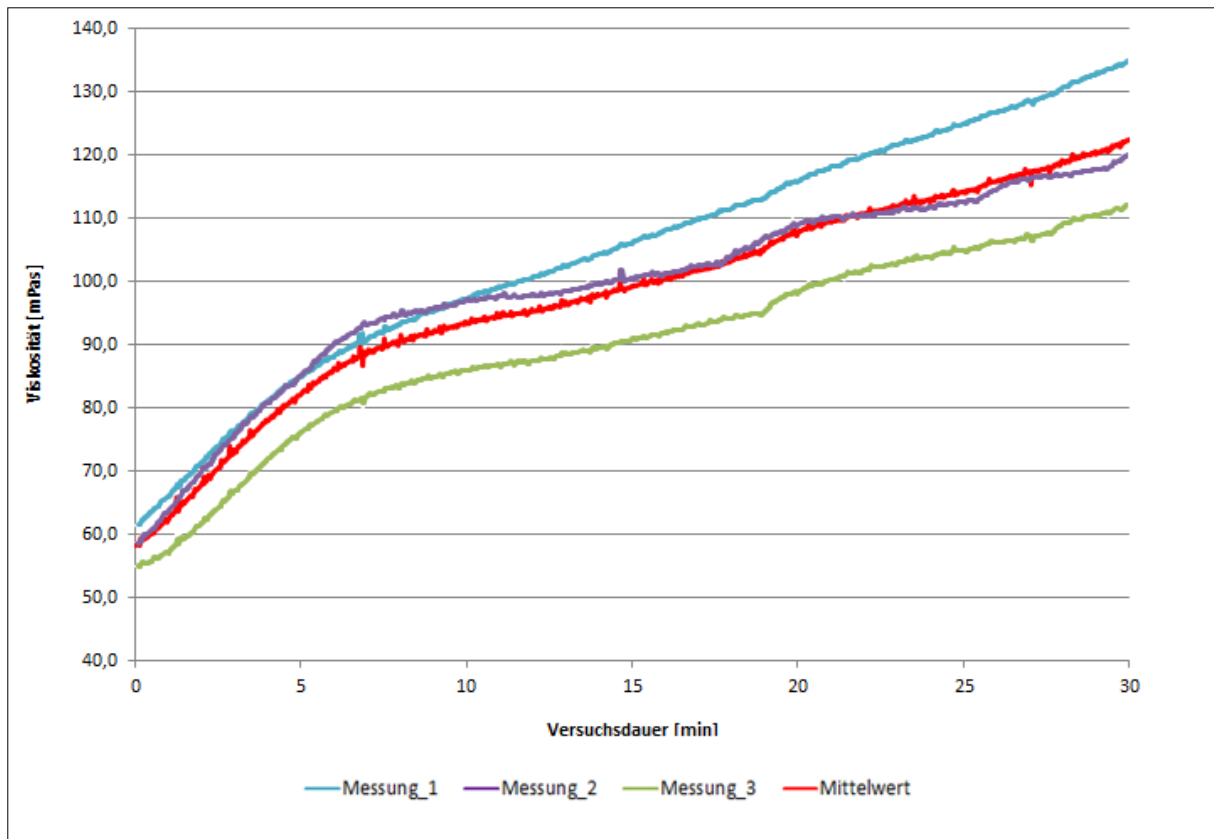
Anhang 30: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von IM 4+ bei 30° C



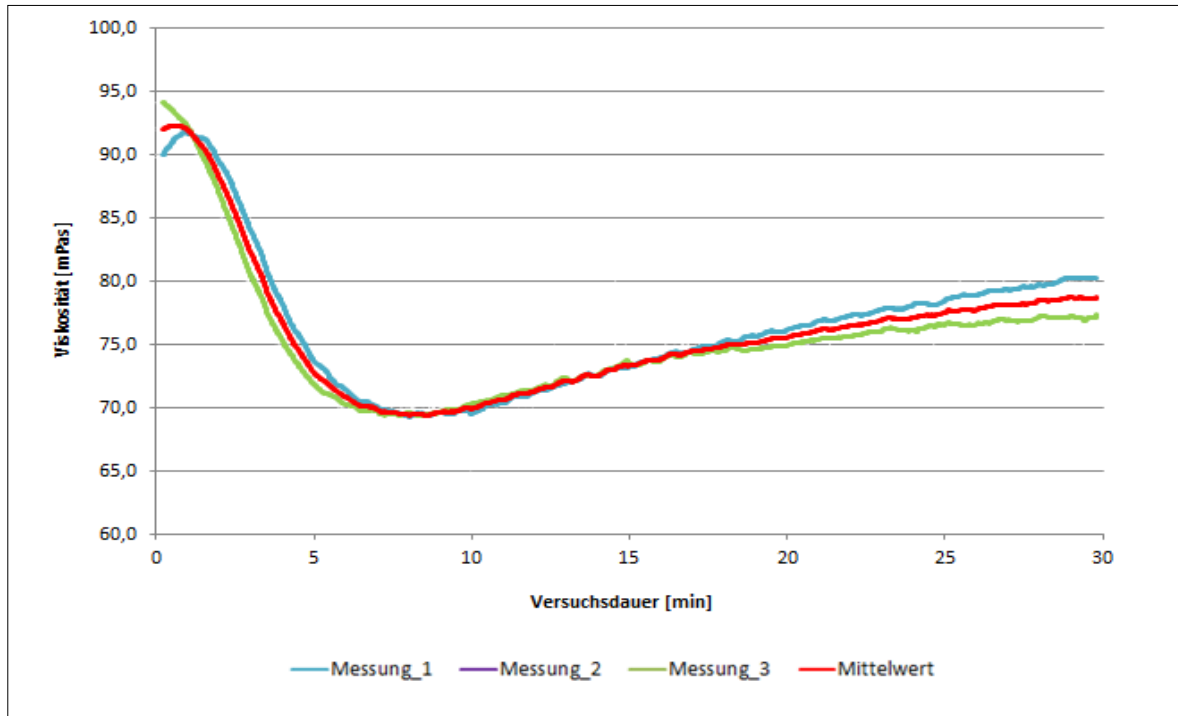
Anhang 31: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von IM 4+ bei 40° C



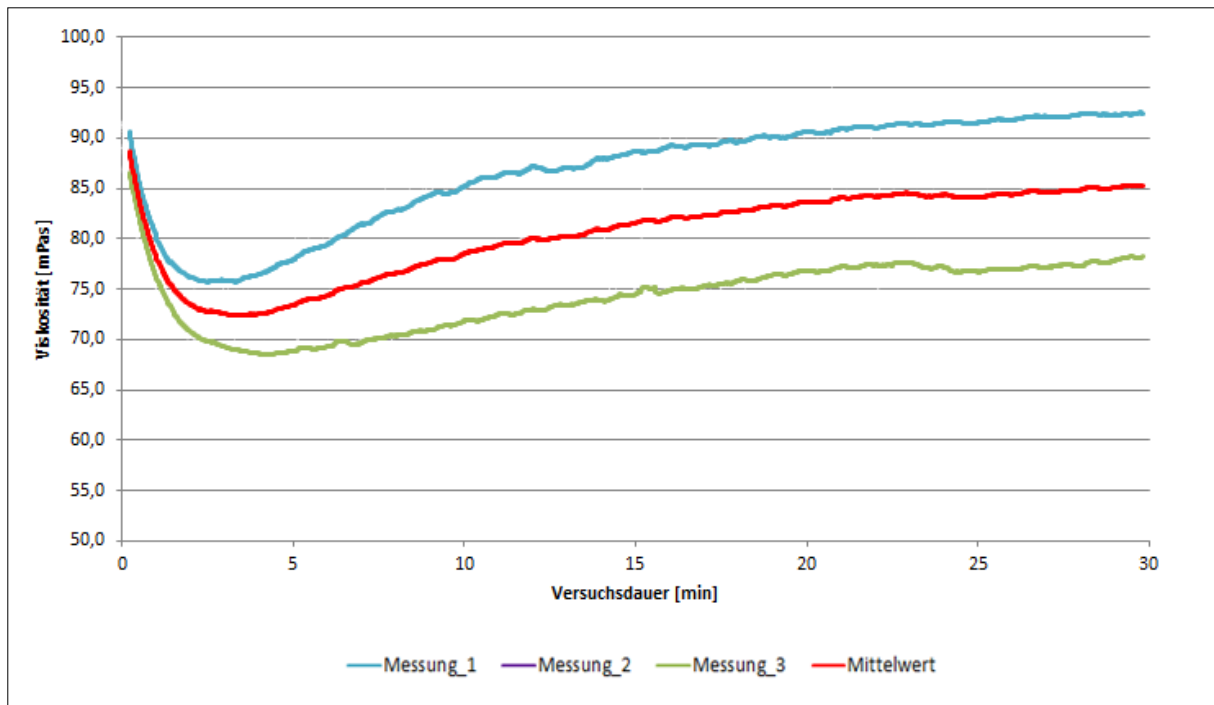
Anhang 32: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Ultrafin 12 bei 30° C



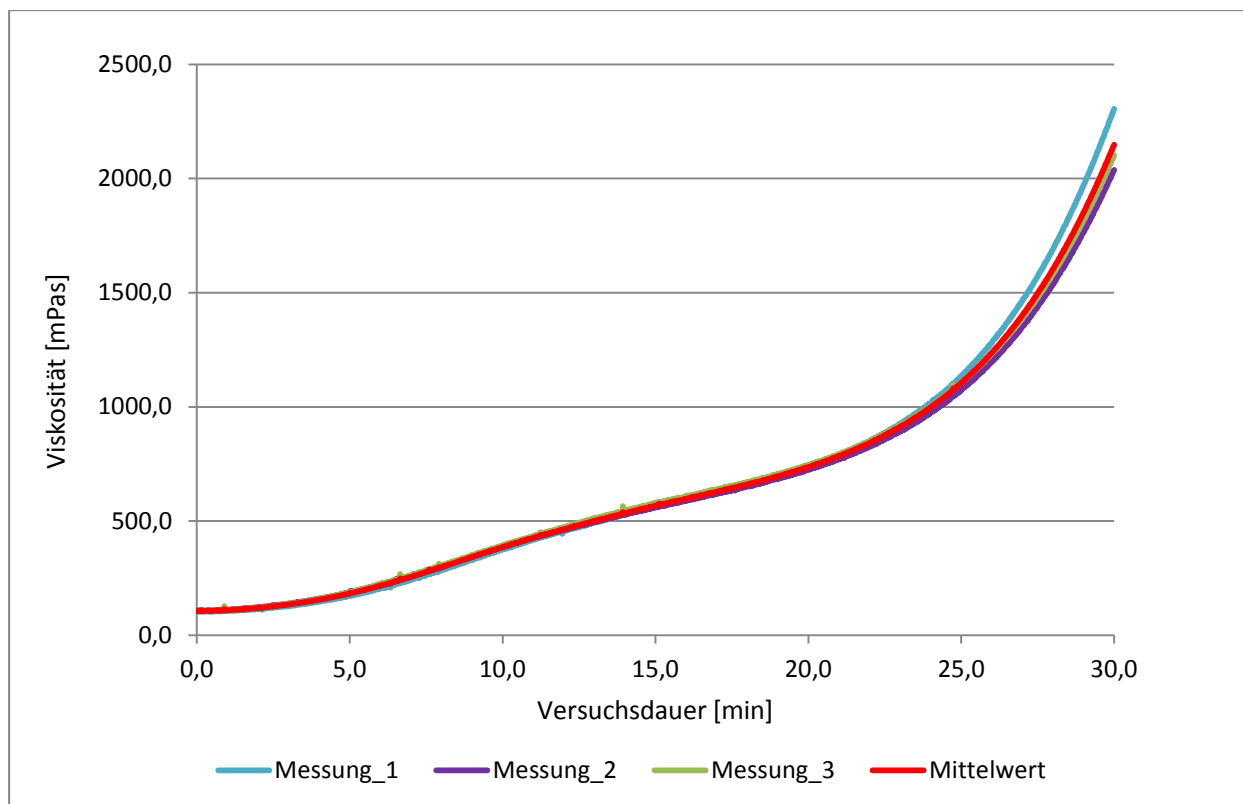
Anhang 33: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Ultrafin 12 bei 40° C



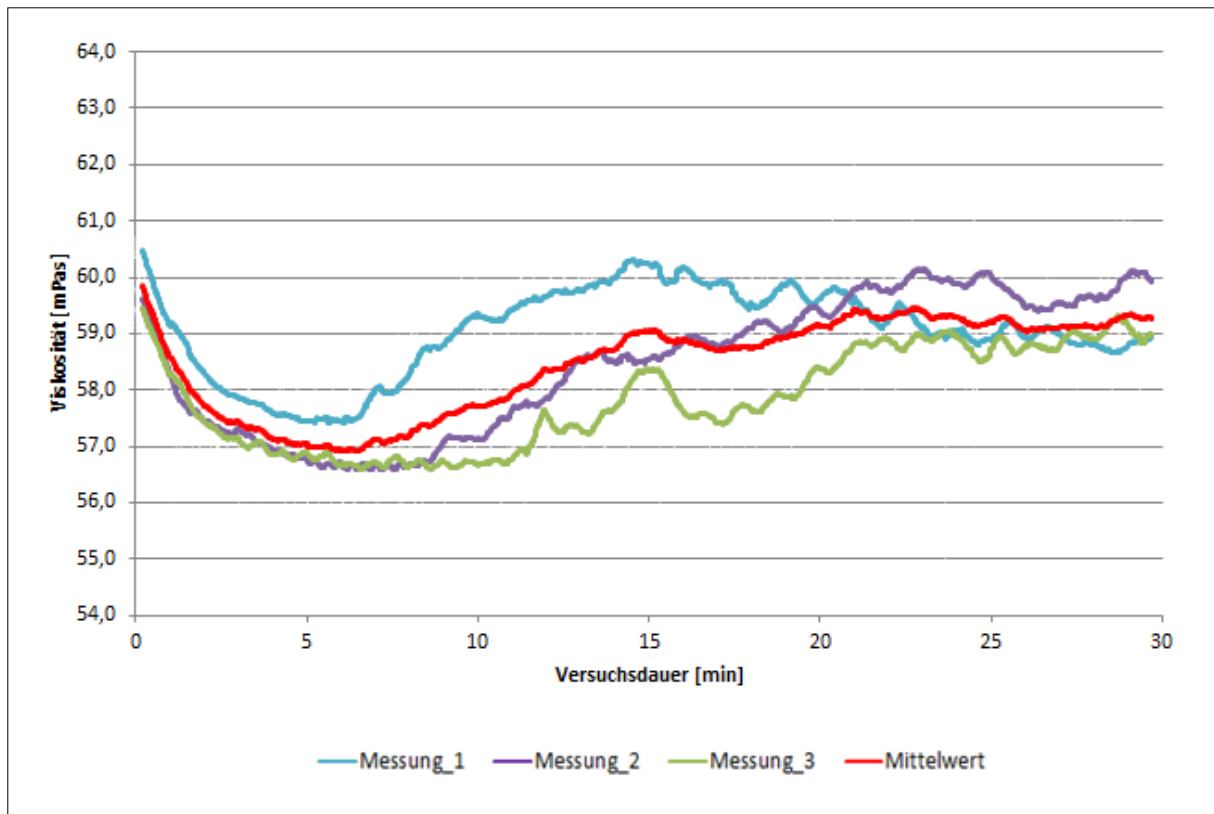
Anhang 34: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung der mit 90% NaCl gesättigter Lösung angemischter Ultrafin 12 Suspension bei 30° C



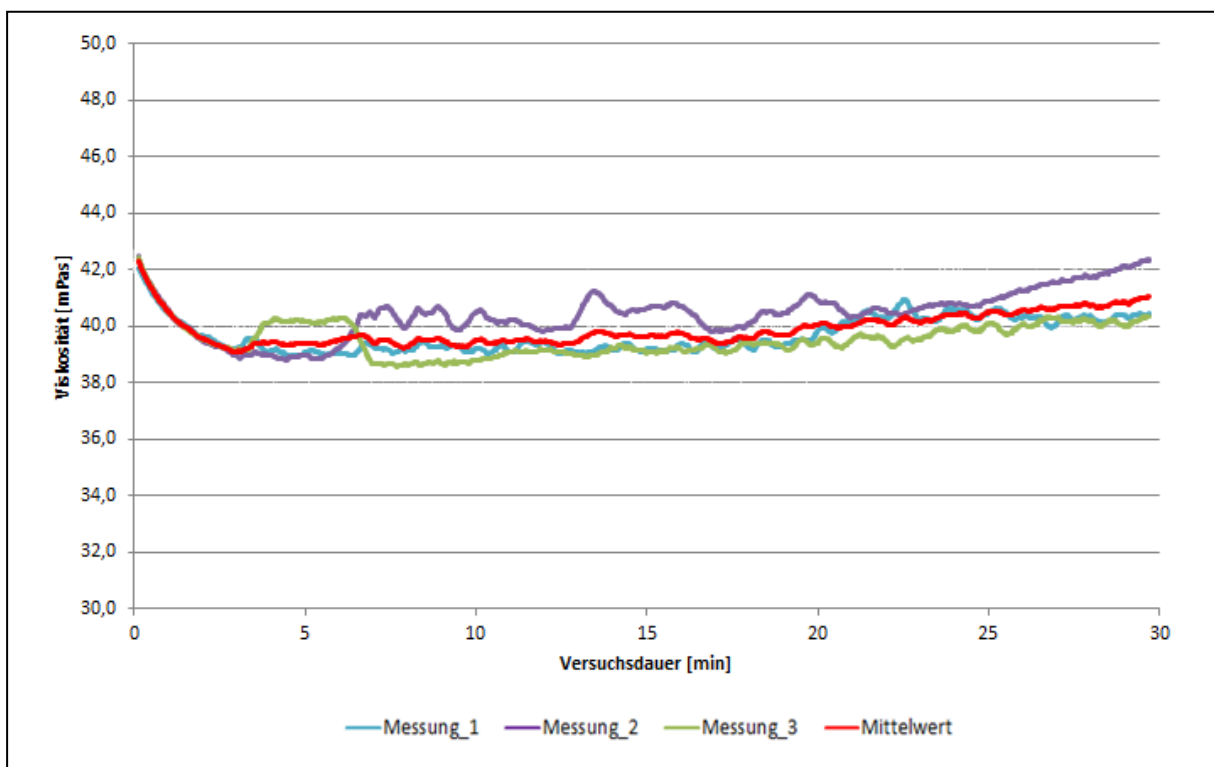
Anhang 35: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung der mit 90% NaCl gesättigter Lösung angemischter Ultrafin 12 Suspension bei 40° C



Anhang 36: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung des 2K-Bitumens bei 30° C

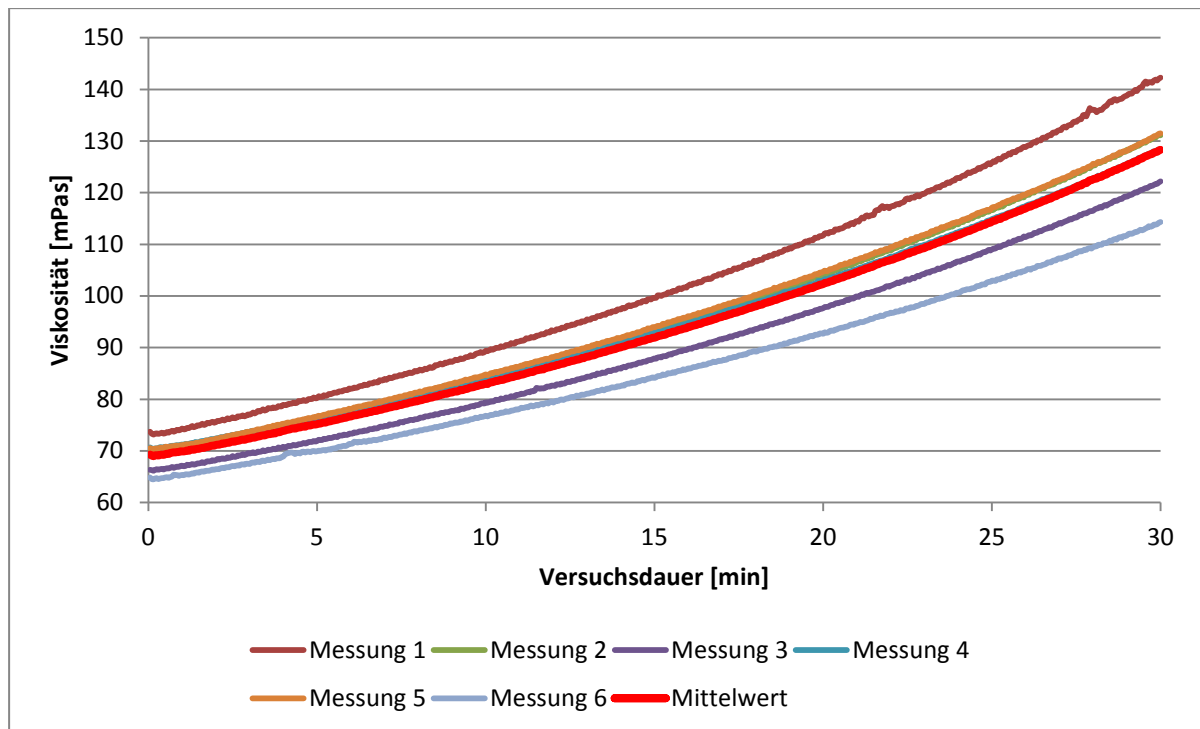


Anhang 37: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Wasserglas bei 30° C

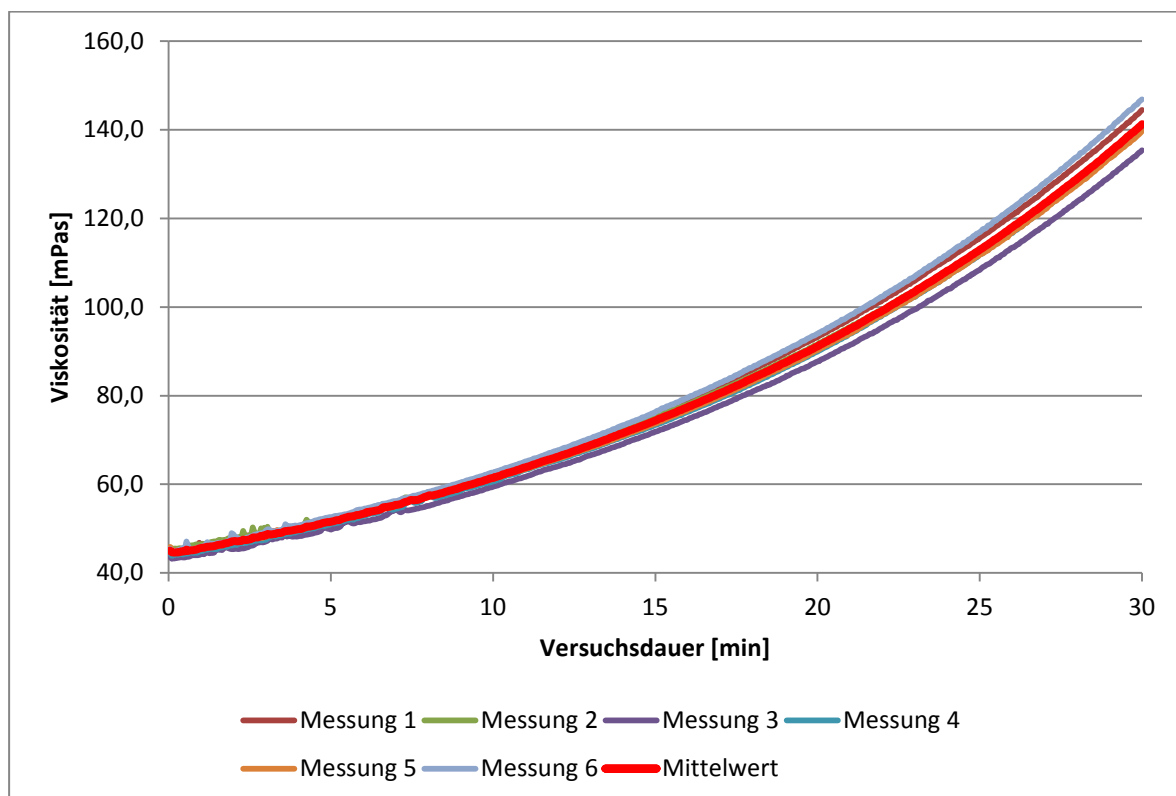


Anhang 38: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Wasserglas bei 40° C

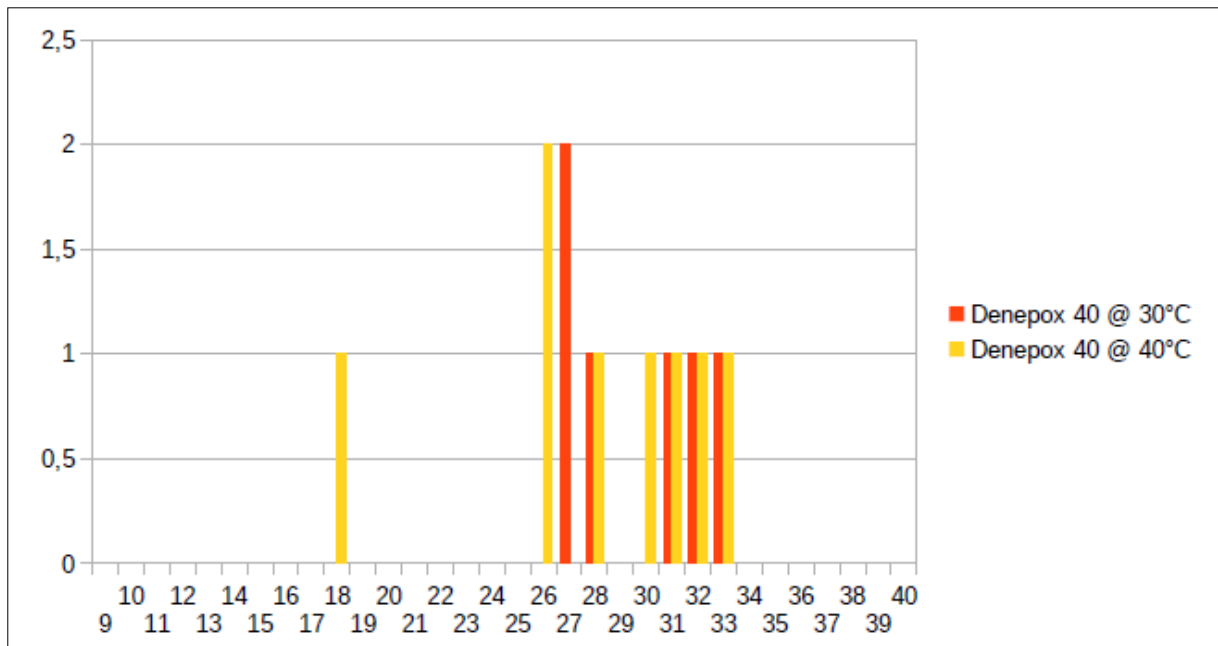




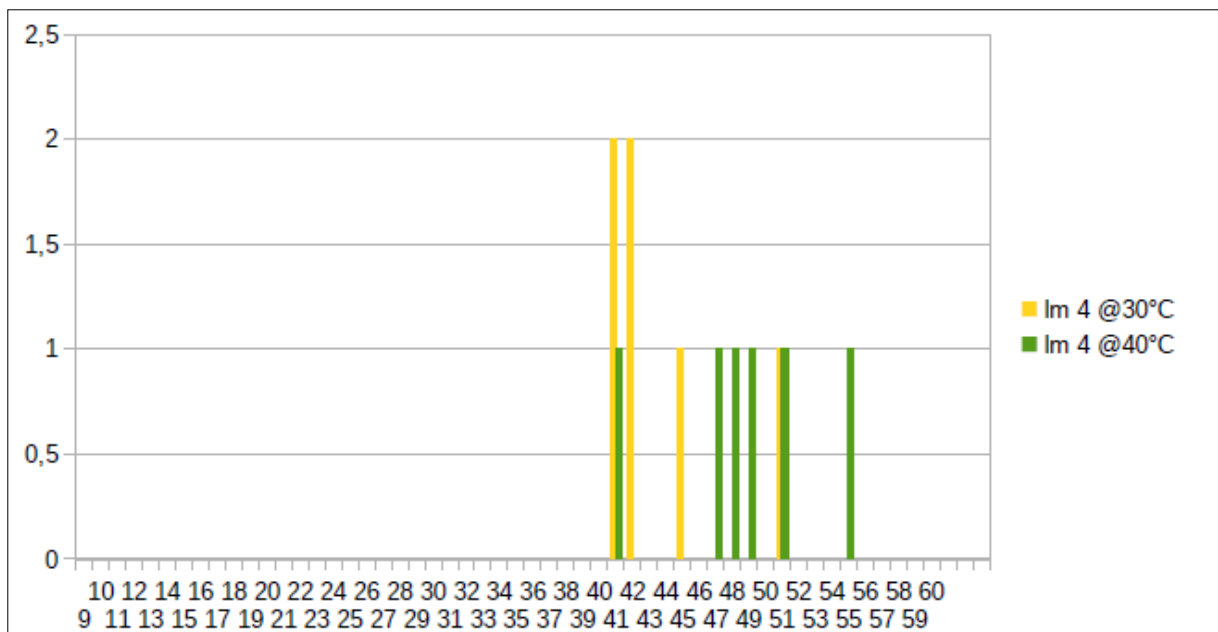
Anhang 39: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Denepox 40 bei 30° C



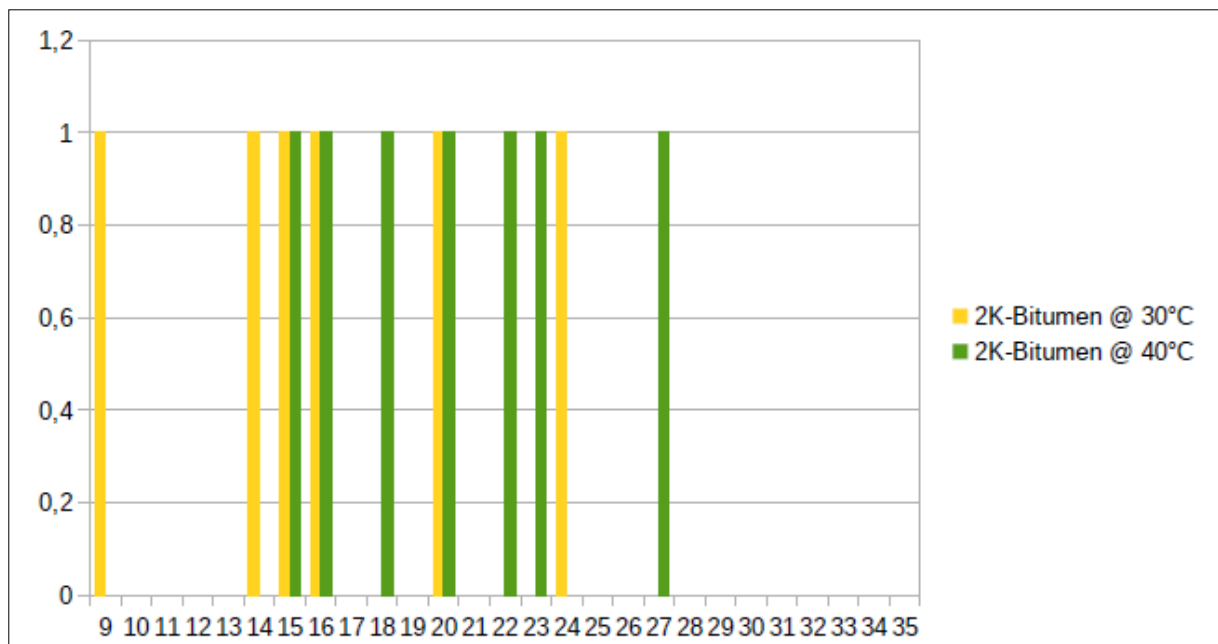
Anhang 40: Kurvenverläufe der Viskositätsmessung von Denepox 40 bei 40° C



Anhang 41: Häufigkeitsverteilung der Kontaktwinkelmessungen mit dem Injektionsharz Denepox 40 bei 30° und 40° C.



Anhang 42: Häufigkeitsverteilung der Kontaktwinkelmessungen mit dem Feinstmagnesiabinder IM 4+ bei 30° und 40° C.



Anhang 43: Häufigkeitsverteilung der Kontaktwinkelmessungen mit dem 2K-Bitumen bei 30° und 40° C.

Anhang 44: Tabellarische Auswertung der mit Wasserglas injizierten bGZ-Salzbeton Probenkörper (Nr. 9,10,12 und 16)

Probenkörper	Schnitt	Riss Lokalität				Rissfüllung im Kontaktbereich				Injektion des Salzes			
		Kein Riss	Riss entlang des Kontaktbereichs	Entfernung < 1 cm zum Kontaktbereich	Entfernung 1 bis 2 cm zum Kontaktbereich	Kat 1	Kat 2	Kat 3	Kat 4	Keine Injektion	< 1/6 der Fläche	1/6 bis 3/6 der Fläche	> 3/6 der Fläche
9	S1_Links_I	X				X							
	S1_Links_A	X				X				x			
	S1_Rechts_I	X				X							
	S1_Rechts_A	x				X							
	S2_Links_I			X			x						
	S2_Links_A	x				x					x		
	S2_Rechts_I			x			x						
	S2_Rechts_A	x				x							
	S3_Links_I	X				X							
	S3_Links_A	X				X				x			
10	S3_Rechts_I	X				X							
	S3_Rechts_A	X				X							
	Summe P9	10	0	2	0	10	2	0	0	2	1		
	S1_Links_I	x				X							
	S1_Links_A	x				X							
	S1_Rechts_I	x				X				x			
	S1_Rechts_A	x				X							
	S2_Links_I	x				X							
	S2_Links_A	x				X							x
	S2_Rechts_I	x				X							
	S2_Rechts_A	x				X							



	S3_Links_A	X																		
	S3_Rechts_I	X							X											
	S3_Rechts_A	X							X											
	Summe P16	12	0	0	0	12	0	0	0	0	0	1								
	Summe Gesamt	42	3	3	0	42	3	3	0	0	6	1	3	2						
	Prozent	88	6	6	0	88	6	6	6	0	50	8	25	17						

Anhang 45: Tabellarische Auswertung der mit Ultrafin 12 injizierten bGZ-Salzbeton Probenkörper (Nr. 2,7,14 und 17)

Proben- körper	Schnitt	Riss Lokalität				Rissfüllung im Kontaktbereich				Injektion des Salzes			
		Kein Riss	Riss entlang des Kontaktbereichs	Entfernung < 1 cm zum Kontaktbereich	Entfernung 1 bis 2 cm zum Kontaktbereich	Kat 1	Kat 2	Kat 3	Kat 4	Keine Injektion	< 1/6 der Fläche	1/6 bis 3/6 der Fläche	> 3/6 der Fläche
2	S1_Links_I				x				X				
	S1_Links_A				x				x	x			
	S1_Rechts_I				x				x				
	S1_Rechts_A			x				x					
	S2_Links_I		x					x					
	S2_Links_A			x			x						x
	S2_Rechts_I		x					x					
	S2_Rechts_A			x			x						
	S3_Links_I		X				x						
	S3_Links_A		X					x			x		
	S3_Rechts_I		X					x					
	S3_Rechts_A		x				X						
Summe P2		0	6	3	3	0	4	5	3	1	1	0	1
7	S1_Links_I				X		x						
	S1_Links_A			x			x						x
	S1_Rechts_I	X				x							
	S1_Rechts_A	x				X							
	S2_Links_I			x			x						
	S2_Links_A		x			x							x
	S2_Rechts_I			x				x					
	S2_Rechts_A		x				x						





[illegible]

Anhang 46: Tabellarische Auswertung der mit Wasserglas injizierten Magnesiabinder MB10 Probenkörper (Nr. 1,4,13 und 18)

Proben- körper	Schnitt	Riss Lokalität				Rissfüllung im Kontaktbereich					Injektion des Salzes			
		Kein Riss	Riss entlang des Kontaktbereichs	Entfernung < 1 cm zum Kontaktbereich	Entfernung 1 bis 2 cm zum Kontaktbereich	Kat 1	Kat 2	Kat 3	Kat 4	Keine Injektion	< 1/6 der Fläche	1/6 bis 3/6 der Fläche	> 3/6 der Fläche	
1	S1_Links_I				x			x						
	S1_Links_A			x			x					x		
	S1_Rechts_I			x					x					
	S1_Rechts_A			x			x							
	S2_Links_I			x				x						
	S2_Links_A				x		x					x		
	S2_Rechts_I			x			x							
	S2_Rechts_A	x				x								
	S3_Links_I				x	x								
	S3_Links_A				x	x								
4	S3_Rechts_I			x		x						x		
	S3_Rechts_A			x		x								
	Summe P1	1	0	8	3	5	4	2	1	0	1	2	0	
	S1_Links_I			x				x						
	S1_Links_A	x				x								
	S1_Rechts_I			x		x				x				
	S1_Rechts_A	x				x								
	S2_Links_I			x			x							
	S2_Links_A			x			x							x
	S2_Rechts_I		x					x						
S2_Rechts_A				x			x							



[illegible]

Anhang 47: Tabellarische Auswertung der mit Ultrafin 12 injizierten Magnesiabinder MB10 Probenkörper (Nr.3,8,11 und 19)

Proben- körper	Schnitt	Riss Lokalität				Rissfüllung im Kontaktbereich				Injektion des Salzes			
		Kein Riss	Riss entlang des Kontaktbereichs	Entfernung < 1 cm zum Kontaktbereich	Entfernung 1 bis 2 cm zum Kontaktbereich	Kat 1	Kat 2	Kat 3	Kat 4	Keine Injektion	< 1/6 der Fläche	1/6 bis 3/6 der Fläche	> 3/6 der Fläche
3	S1_Links_I			x			x						
	S1_Links_A	x				x					x		
	S1_Rechts_I				x		x						
	S1_Rechts_A	x				x							
	S2_Links_I			x				x					
	S2_Links_A		x				x						x
	S2_Rechts_I			x					x				
	S2_Rechts_A			x					x				
	S3_Links_I			x			x						
	S3_Links_A			x			x						x
8	S3_Rechts_I			x			x						
	S3_Rechts_A			x		x							
	Summe P3	2	1	8	1	3	6	1	2	0	1	0	2
	S1_Links_I	x				x							
	S1_Links_A	x				x							x
	S1_Rechts_I	x				x							
	S1_Rechts_A	x				x							
	S2_Links_I			x		x							
	S2_Links_A				x		x						
	S2_Rechts_I				x	x							
S2_Rechts_A			x			x							

[illegible]

[illegible]